Die Lehre von der Elektricität

Gustav Heinrich Wiedemann

DIE LEHRE

VON DER

ELEKTRICITÄT.

VIERTER BAND.

ERSTE ABTHEILUNG.

Holzstiche
aus dem xylographischen Atelier
von Friedrich Vieweg und Sohn
in Braunschweig.

Papier
aus der mechanischen Papier-Fabrik
der Gebrüder Vieweg zu Wendhausen
bei Braunschweig.

DIE LEHRE

VON DER

ELEKTRICITÄT

VON

Heinrich

GUSTAV WIEDEMANN.

ZUGLEICH ALS DRITTE VÖLLIG UMGEARBEITETE AUFLAGE DER LEHRE VOM GALVANISMUS UND ELEKTROMAGNETISMUS.

VIERTER BAND.

MIT ZAHLREICHEN IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

ERSTE ABTHEILUNG.

BRAUNSCHWEIG,
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.
1885.

INHALT.

VI. Wirkungen der elektrischen Ströme in die Ferne.

D. Induction.

Erstes Capitel.

Zweites Capitel.

Drittes Capitel.

Viertes Capitel.

VII. Elektrisches Verhalten der Gase.

Erstes Capitel.

D.

INDUCTION.

Erstes Capitel.

Induction in linearen Leitern.

I. Grunderscheinungen der Induction.

a. Induction zweier Leiter auf einander und eines Magnets auf einen Leiter.

1 Während bei den elektrodynamischen und elektromagnetischen Phänomenen die in den Körpern fliessenden elektrischen Massen ihre Anziehungs- und Abstossungswirkungen auf die Körper selbst übertragen und sie in Bewegung versetzen, kann umgekehrt in einem ruhenden, nicht vom Strome durchflossenen Körper eine neue Bewegung der Elektricitäten, ein galvanischer Strom erzeugt werden, wenn sich in einem ihm benachbarten Körper in irgend einer Weise die Bewegung der Elektricitäten ändert.

Durch eine Reihe ebenso einfacher wie genialer Versuche hat Faraday[1]) mit Bestimmtheit zuerst nachgewiesen, dass bei einer jeden

---

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. I, 24. Nov. 1831*, Ser. II, 12. Jan. 1832*. Die früheren Versuche in diesem Gebiete sind äusserst unbestimmt. So glaubte z. B. A. von Humboldt wahrzunehmen, dass ermüdete Froschschenkel wohl durch Armirung des Nervs mit einem Stahlmagnet, nicht mit gewöhnlichem Stahl zuckten (Gereizte Muskelfaser 1, p. 114, 1797*); er fand indess bei anderen Versuchen den Einfluss des Magnetismus hierbei nicht bestätigt. Aehnliche Versuche stellte Arnim (Gilb. Ann. 3, p. 63, 1800*) an, indem er einen Froschnerv mit einem Eisenstück und einem Magnete berührte. Er erhielt dabei eine Zuckung; ebenso bei Berührung des Nervs und des Muskels mit den ungleichnamigen Polen zweier gleicher Magnete, deren andere Pole an einander gebracht wurden; nicht aber bei Berührung mit den gleichnamigen Polen der Magnete. Indess auch diese Versuche sind sehr unsicher. Ritter glaubte zu finden, dass zwei Eisennadeln, von denen die eine magnetisirt war, elektromotorisch gegen einander wirkten (Gereizte Muskelfaser 2, p. 189, 1797*). — Einen grossen Schritt weiter thaten Ampère und de la Rive (Ann. de Chim. et de Phys. 25, p. 271, 1824*; Pogg. Ann. 8, p. 368*). Dieselben hängten einen in sich geschlossenen

Veränderung der Lage eines von einem galvanischen Strom durchflossenen Leiters oder eines Magnetes, sowie bei jeder Aenderung der Intensität des Stromes in einem feststehenden Leiter oder der Grösse des magnetischen Momentes des Magnetes in einem dem Leiter oder Magnet benachbarten Körper ein galvanischer Strom entsteht. Diesen Strom bezeichnet man mit dem Namen inducirter Strom oder Inductionsstrom. Die bei seiner Erzeugung ausgeübte Wirkung des bewegten oder seine Intensität ändernden, primären oder inducirenden Stromes nennt man Volta-Induction oder, wenn der inducirte Strom durch einen Magnet hervorgerufen wird, Magneto-Induction, den inducirten Strom selbst aber im letzteren Falle einen magneto-elektrischen Strom.

Wir betrachten zuerst im Allgemeinen nach einander diese beiden Arten der Induction in ihren einfachsten Fällen, zunächst bei Anwendung linearer Leiter.

2 Verbindet man die Enden eines geradlinigen oder zickzackförmig auf einem Brett befestigten Drahtes B durch zwei lange, mit Seide übersponnene und um einander gewundene Drähte mit einem Galvanometer, legt neben jenen Draht einen ganz gleichen Draht A und leitet durch denselben den Strom einer Säule, so schlägt die Nadel des Galvanometers nach der einen oder anderen Seite in dem Augenblicke aus, wo man den Kreis des den Draht A durchlaufenden Stromes schliesst oder öffnet. Um das Oeffnen und Schliessen des Stromes bequem vornehmen zu können, kann man sich der Bd. I, §. 316 angegebenen Vorrichtungen bedienen oder auch den Leitungsdraht zwischen der Säule und dem Draht A an einer Stelle unterbrechen, das eine Ende desselben direct mit einem Quecksilbernapf verbinden und in den letzteren abwechselnd das andere Ende eintauchen und aus demselben herausheben. Sowohl nach dem Schliessen, als auch nach dem Oeffnen des Stromkreises im Draht A kehrt die Nadel des Galvanometers nach ihrem ersten Ausschlage in ihre Ruhelage zurück; vorausgesetzt, dass die Drähte A und B so weit von dem Galvanometer entfernt sind, dass der Strom in A nicht direct durch seine elektromagnetische Wirkung die Nadel desselben dauernd ablenkt. Die Richtung des Ausschlages der Nadel zeigt, dass beim Schliessen des Stromkreises in A ein momentaner Strom in B inducirt wird, dessen Richtung dem Strome in A entgegengesetzt ist. Beim Oeffnen des Stromkreises in A wird da-

---

Kupferreifen in dem kreisförmigen Schliessungsbogen eines Stromes frei auf. Bei Annäherung eines Hufeisenmagnetes wurde je nach der Stromesrichtung der Reifen angezogen oder abgestossen. Indess verfolgten sie diesen Versuch nicht weiter. Erst Faraday kam durch ein näheres Studium des von Arago entdeckten sogenannten Rotationsmagnetismus, d. h. der Ablenkung einer Magnetnadel über einer rotirenden Metallscheibe und einer frei aufgehängten Metallmasse über einem bewegten Magnet (siehe das Capitel: Induction in körperlichen Leitern) auf die richtige Erkenntniss der Inductionserscheinungen.

gegen in *B* ein dem Strom in *A* gleichgerichteter, momentaner Strom inducirt. Man bezeichnet die beiden, so erhaltenen Inductionsströme mit dem Namen Schliessungsstrom und Oeffnungsstrom.

Statt den Strom in *A* entstehen und vergehen zu lassen, genügt es, seine Intensität zu steigern oder zu vermindern, z. B. indem man erst durch eine Nebenschliessung bewirkt, dass nur ein Theil des Stromes der Säule durch *A* fliesst, und sodann die Nebenschliessung entfernt und später wieder einfügt. Die Induction in *B* ist dieselbe, wie wenn neben dem zuerst durch *A* fliessenden permanenten Strom, welcher keine inducirende Wirkung ausübt, noch in *A* ein neuer, der Aenderung der Stromintensität entsprechender Strom entstanden und nachher wieder verschwunden wäre.

3 Man kann die inducirende Wirkung der Leiter verstärken, wenn man sie in mehreren Windungen über einander legt und so auf einander wirken lässt. Zu dem Ende bedient man sich zweckmässig zweier Spiralen von übersponnenem Kupferdraht *A* und *B*, Fig. 1, von denen die

Fig. 1.

erste durch die Drähte x und y mit den Poldrähten der Säule verbunden wird, die zweite *B* durch die Klemmen p und q mit dem Galvanometer in Verbindung steht. Die inducirte oder Inductionsspirale *B* (auch wohl Nebenrolle genannt) ist auf einem Schlitten s befestigt, so dass sie sich gerade über die primäre oder inducirende Spirale oder Hauptrolle *A* hinüberschiebt. Man kann die Spiralen in verschiedenen Entfernungen von einander aufstellen und die Inductionsströme in *B* untersuchen, wenn *A* abwechselnd mit einer Säule verbunden oder die Verbindung aufgehoben wird. In diesem Falle inducirt der in jeder einzelnen Windung der inducirenden Spirale *A* fliessende Strom in jeder Windung der Inductionsspirale *B* einen entgegengesetzt oder gleich gerichteten Strom, und so vermehrt sich die inducirende Wirkung, abgesehen von den Nebenumständen, mit der Anzahl der Windungen auf beiden Spiralen und nimmt mit der Entfernung der Spiralen von einander ab.

Befestigt man die Inductionsspirale *B* an einer auf dem Brette *K* stehenden, durch ihre Mitte gehenden verticalen Axe, so kann man zeigen, dass die inducirende Wirkung mit wachsendem Neigungswinkel der Axen der Spiralen gegen einander abnimmt[1]).

Fig. 2.

Sehr gut kann man diese Inductionserscheinungen auch an Bandspiralen[2]), Fig. 2, beobachten, d. h. an flachen Spiralen, welche aus etwa 1 bis 2 Zoll breiten und 20 bis 30 m langen Kupferblechstreifen gewickelt sind, deren beide Seiten mit Seidenband bedeckt werden.

4 Will man stärkere Wirkungen der, beim Oeffnen und Schliessen einer Stromesleitung in einem benachbarten Leiter inducirten Oeffnungs- und Schliessungsströme erhalten, so verwendet man zweckmässig eine ganze Reihe solcher Ströme, indem man die primäre Leitung oft hinter einander öffnet und schliesst und durch eine besondere Vorrichtung in die der Wirkung der Inductionsströme auszusetzenden Körper nur die Oeffnungs- oder nur die Schliessungsströme eintreten lässt.

Man bedient sich hierzu des **Disjunctors**, eines zuerst von Dove[3]) angegebenen Apparates. Derselbe lässt sich mit einigen Abänderungen folgendermaassen construiren: Man setzt auf die beiden Hälften einer, durch eine isolirende Schicht, z. B. von Elfenbein, in der Mitte getheilten Metallaxe *ab*, Fig. 3, zwei Metallräder *c* und *c'* auf, deren Ränder abwechselnd mit nicht leitenden Segmenten *d* und *e* von Elfenbein oder Hartgummi ausgelegt sind. Gegen die Räder schleifen die mit den gleichnamigen

Fig. 3.

---

[1]) Bowditch, Proceed. Amer. Acad. 11, p. 281, 1878*. — [2]) Henry, Trans. Amer. Philos. Soc. 6*; Pogg. Ann. Ergänzungs-Bd. 1, p. 282, 1842*. — [3]) Bei dem Disjunctor von Dove (Pogg. Ann. 43, p. 512, 1838*) waren die Räder *c* und *c'* durch weit ausgezackte, sternförmige Räder ersetzt, deren Zacken in untergestellte Quecksilberrinnen tauchten. Neben denselben waren auf die Metallaxe volle Metallräder gesetzt, deren Ränder in andere Quecksilberrinnen eingesenkt waren und durch welche die Leitung vermittelt wurde. — Statt der mit isolirenden Sectoren ausgelegten Räder des gezeichneten Apparates kann man

Klemmschrauben verbundenen Federn *f*, *g* und *h*, *i*. Die Räder *c* und *c'* können durch eine Kurbel oder durch ein besonderes Schwungrad und einen Schnurlauf mit der sie tragenden Axe in Rotation versetzt werden. Man schaltet durch die Klemmschrauben *f* und *g* das Rad *c* in einen Schliessungskreis ein, welcher eine Säule und die inducirende Spirale enthält, während das Rad *c'* durch die Klemmschrauben *h* und *i* in den Schliessungskreis der Inductionsspirale eingefügt wird.

Hat man die Räder *c* und *c'* so auf die Axe aufgesetzt, dass bei ihrer Drehung die Federn *h* und *i* eher auf die Metalloberflächen des Rades *c'* treten, als die Federn *f* und *g* auf die Metalloberflächen des Rades *c*, dagegen erstere auch früher von jenen Oberflächen abgleiten als letztere, so ist der Schliessungskreis des inducirten Stromes nur bei der Schliessung des primären Stromes geschlossen, bei der Oeffnung desselben geöffnet; durch den Kreis des inducirten Stromes kann nur der Schliessungsstrom hindurchgehen. — Verstellt man die Räder umgekehrt so, dass die Federn *h* und *i* später auf die Metallflächen von *c'* auftreffen und abgleiten, als die Federn *f* und *g* auf die Metallflächen von *c*, so kann durch den Schliessungskreis der Inductionsspirale nur der Oeffnungsstrom fliessen. — Wählt man die Metallflächen des Rades *c'* etwas breiter als die des Rades *c*, so kann man beide Räder so stellen, dass die Mitten ihrer Metallflächen einander entsprechen. Dann wird bei der Drehung der Räder der inducirte Kreis vor dem inducirenden geschlossen und nach dem Oeffnen desselben geöffnet, und durch den ersteren gehen sowohl die Schliessungs- wie die Oeffnungsströme hindurch.

Will man eine Reihe abwechselnd gerichteter Inductionsströme erzeugen, so kann man das abwechselnde Oeffnen und Schliessen des inducirenden Kreises auch durch einen selbstthätigen Unterbrecher, z. B. durch ein Barlow'sches Rad (Bd. III, §. 186) oder den Bd. III, §. 187 beschriebenen Rotationsapparat von Ritchie vornehmen. Zweckmässiger benutzt man hierzu den Wagner-Neef'schen Hammer [1]), dessen sich auch E. du Bois-Reymond in seinem sehr zweckmässigen Schlittenapparat zur Erzeugung von Inductionsströmen bedient. Dieser Apparat, Fig. 4, hat im Wesentlichen die Construction des Fig. 1 gezeichneten Apparates, an dem noch vor dem Brett *N* der Wagner'sche Hammer angebracht ist, welcher den durch die inducirende Spirale *A* geleiteten Strom unterbricht. 5

Fig. 5 (a. f. S.) giebt eine besondere Zeichnung des Hammers in etwas anderer Form wie in Fig. 4. Die Buchstaben der Fig. 4 und 5 passen beide für die folgende Beschreibung.

---

auch gewöhnliche Zahnräder von Metall verwenden oder auch Räder von Holz, Elfenbein u. s. f., welche man mit Metalleinlagen *d* und *e* versieht. — Aehnliche Apparate von Wartmann, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 22, p. 5, 1848*, Edlund u. A.

[1]) J. P. Wagner, Pogg. Ann. 46, p. 107, 1839*.

Die mit dem einen Pol einer Säule verbundene Klemmschraube *f* steht mit dem Spiraldraht eines Elektromagnets *M* in Verbindung, dessen anderes Ende zur Klemmschraube *e* führt. Der Elektromagnet selbst

Fig. 4.

besteht aus zwei, zur Vermeidung des magnetischen Residuums hohlen Eisenröhren, welche unten auf eine Eisenplatte aufgeschraubt und oben durch kleine polirte Eisencylinder geschlossen sind. Ueber den Polen des

Fig. 5.

Magnetes befindet sich der parallelepipedische Anker *n* von Eisen, welcher an dem einen Ende einer flachen, auf das obere Ende des Metallstabes *d* aufgeschraubten Messingfeder *o* befestigt ist. Um die unmittelbare Berührung des Ankers mit dem Magnet zu vermeiden, bei welcher er auch nach der Oeffnung des magnetisirenden Stromes am Magnet haften würde, ist er unterhalb mit einem Papier- oder Messingstreifen

belegt. Auf die Feder *o* ist unmittelbar ein kleines Platinplättchen *c* aufgelöthet, Fig. 4, oder nach Halske[1]) eine zweite kleine Feder *p*, Fig. 5, aufgesetzt, welche das Platinplättchen *c* trägt. Dieses Plättchen drückt im Ruhezustande der Feder *o* gegen eine Platinspitze, welche an einer in das Messingstativ *b* eingeschraubten Messingschraube *q* befestigt ist. Das Stativ *b* ist mit der Klemmschraube *a* verbunden. — Zwischen den Klemmen *e* und *a* wird die inducirende Spirale *A* vermittelst ihrer Enden *x* und *y* eingefügt. — Verbindet man den zweiten Pol der Säule mit der Klemmschraube *d*, so fliesst der Strom von *d* durch *o*, zwischen Platte *c* und Schraube *q* hindurch über *b* und *a*, sodann durch die inducirende Spirale nach *e* und um den Magnet *M* nach *f*. Der letztere wird dadurch magnetisch und zieht den Anker *n* an. Dabei wird der Strom bei *c* unterbrochen; die Magnetisirung von *M* hört auf und das Platinplättchen *c* wird wieder gegen die Spitze *q* gedrückt u. s. w. — Die Feder *p*, Fig. 5, bewirkt hierbei, dass, wenn der Magnet *M* schon durch den seine Windungen durchfliessenden Strom magnetisirt ist, und sich der Anker *n* mit der Feder *o* gegen seine Pole hinbewegt, doch noch einige Zeit durch die Federkraft von *p* der inducirende Strom zwischen der Schraube *q* und der darunter befindlichen Platinplatte *c* geschlossen bleibt und erst, wenn der Anker eine sehr grosse Geschwindigkeit erlangt hat, ganz plötzlich unterbrochen wird. Auf diese Weise geschieht die Induction in der Inductionsrolle in kürzerer Zeit, was für manche Zwecke praktisch ist, z. B. wenn man durch die Inductionsströme bedeutende physiologische Wirkungen oder Funkenentladungen hervorrufen will.

Will man diese schnelle Oeffnung des inducirenden Stromes nicht herstellen, so kann man an dem Apparat die Feder *p* fortlassen und, wie in Fig. 4, die auf derselben angebrachte Platinplatte unterhalb der Schraube *q* direct auf die Feder *o* auflöthen. — Will man den Strom in der inducirenden Rolle noch öfter unterbrechen, als bei jeder Hin- und Herschwingung der Feder *o* des Apparates Fig. 5, oder ihn in abwechselnder Richtung durch die Rolle leiten, so kann man an der Feder *o* auch noch unterhalb eine Platinplatte anbringen, der eine zweite Platinspitze gegenüber steht, gegen welche jene Platinplatte beim Niedergang des Ankers *n* gegenschlägt[2]). Man verbindet dann die Enden der inducirenden Rolle mit *e* und *d*, die Pole der Säule mit *a* und *f* und die untere zweite Spitze, sowie die Klemmschraube *e* mit den Polen einer zweiten Säule. Je nachdem hierbei die Verbindung mit den Polen der zweiten Säule in dem einen oder anderen Sinne geschieht, hat beim Anschlagen der Feder gegen die untere Spitze der Strom in der inducirenden Spirale die gleiche oder entgegengesetzte Richtung wie der Strom,

---

[1]) Halske und Poggendorff, Pogg. Ann. **97**, p. 641, 1856*. Vergleiche auch Sinsteden, Pogg. Ann. **96**, p. 366, 1855*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. **91**, p. 290, 1854*.

welcher die Spirale beim Anschlagen der Feder p gegen die obere Spitze q durchfliesst [1]).

6 Mittelst dieser Apparate kann man zeigen, dass die Wirkungen der Inductionsströme die gleichen sind, wie die der gewöhnlichen galvanischen Ströme. Die Ablenkung einer Magnetnadel durch die Inductionsströme haben wir schon erwähnt. Leitet man mit Hülfe des Disjunctors, sei es nur die Oeffnungs- oder nur die Schliessungsinductionsströme durch ein Galvanometer, so erhält man eine permanente Ablenkung seiner Nadel in dem einen oder anderen Sinne. — Leitet man sowohl die Oeffnungs- als auch die Schliessungsströme durch das Galvanometer, so zeigt sich das Phänomen der doppelsinnigen Ablenkung seiner Nadel (Bd. III, §. 189).

Auch die Magnetisirung von Eisen und Stahl kann durch Inductionsströme bewirkt werden. Leitet man z. B. nur einen einzelnen Oeffnungs- oder Schliessungsstrom durch eine Spirale, in welche man eine Stahlnadel eingelegt hat, so erhält sie je nach der Richtung jenes Stromes permanenten Magnetismus. — Bei Anwendung des Disjunctors kann man einen weichen Eisenstab mit Hülfe der Inductionsströme auch für längere Zeit zu einem Elektromagnet machen, indem man durch die ihn umgebende Spirale eine Reihe von Oeffnungs- oder von Schliessungsinductionsströmen leitet.

7 Elektrodynamische Wirkungen zeigen die Inductionsströme ebenfalls. Leitet man sie durch die beiden Rollen eines Bifilardynamometers, so ziehen sich letztere an, wenn auch die Richtung der inducirten Ströme wechselt, da dieser Wechsel gleichzeitig in beiden Rollen des Dynamometers stattfindet. Die Ablenkung der Bifilarrolle entspricht bei gleicher Zeitdauer der Inductionsströme dem Quadrat ihrer Intensität. Das Dynamometer ist in dieser Beziehung ein geeignetes Instrument zur Messung der Intensität jener Ströme. — Leitet man die Inductionsströme nur durch die Bifilarrolle, durch die feste Rolle aber einen constanten Strom, so müssen erstere alle gleichgerichtet sein, um eine constante Ablenkung der Bifilarrolle hervorzubringen.

8 Auch chemische Wirkungen vermögen die Inductionsströme hervorzubringen.

Breitet man ein mit Jodkaliumlösung getränktes Fliesspapier auf einer horizontalen Glasplatte aus und drückt auf dasselbe zwei in geeigneten Stativen (Bd. I, S. 471, Fig. 174) befestigte, verticale und vorher gut ausgeglühte Platindrähte, welche mit den Enden der Inductionsrolle eines du Bois'schen Schlittenapparates [2]) verbunden sind, so

[1]) Ein ähnlicher Apparat von Rijke, Pogg. Ann. **97**, p. 69, 1856*. — [2]) E. du Bois-Reymond, Untersuchungen über thierische Elektricität, **2**, Abthl. I, p. 400, 1849*; Monatsber. der Berl. Akad. 1861, Thl. I, p. 1105*.

genügt eine einmalige Schliessung oder Oeffnung des inducirenden Stromkreises, etwa durch einen Schlüssel (Bd. I, §. 316), um sogleich einen schwarzen Jodfleck unter dem Platindraht erscheinen zu lassen, welcher für den betreffenden Inductionsstrom als positive Elektrode dient. Es bedarf nicht einmal eines Zusatzes von Stärkekleister zur Jodkaliumlösung, um diese Jodabscheidung sichtbar zu machen, welche sich namentlich in durchgehendem Licht von der Hinterseite der Glasplatte aus gut beobachten lässt. Der Jodfleck erscheint beim Oeffnungsinductionsstrom in Folge seiner schnelleren Entwickelung (siehe weiter unten) rascher, als beim Schliessungsinductionsstrom. Dabei bemerkt man stets, dass auch unter der negativen Elektrode ein, wenn auch schwächerer, so doch deutlicher secundärer Jodfleck auftritt, wenn, wie gewöhnlich, der Inductionskreis nach dem Entstehen des Inductionsstromes geschlossen bleibt, und zwar namentlich deutlich bei der Schliessungsinduction etwas später als der primär erzeugte Jodfleck. Dass derselbe von der durch den Polarisationsstrom bedingten Zersetzung des Jodkaliums herrührt, haben wir schon Bd. II, §. 708 erwähnt.

Leitet man einen einzelnen inducirten Strom durch ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Voltameter, so kann man bei nachheriger Verbindung seiner Elektroden mit dem Galvanometer die Polarisation derselben nachweisen. Indess ist letztere nur gering; sehr viel bedeutender wird sie, wenn man mehrere Inductionsströme hinter einander in gleicher Richtung durch das Voltameter führt[1]. — Leitet man die beim Oeffnen und Schliessen des primären Stromes abwechselnd gerichteten Inductionsströme durch ein Voltameter, so erscheinen die Gase Sauerstoff und Wasserstoff abwechselnd an beiden Elektroden und vereinen sich an denselben zum Theil wieder, wenn die Inductionsströme schnell auf einander folgen. Die hierbei auftretenden Erscheinungen haben wir schon Bd. II, §. 629 näher ausgeführt. — Die specifischen Unterschiede, welche man zuweilen hierbei zwischen den Wirkungen der gewöhnlichen Hydroströme und der Inductionsströme aufstellen wollte, haben sich durchaus nicht bestätigt[2].

Lässt man eine Reihe gleich oder abwechselnd gerichteter Inductionsströme durch einen dünnen, in einem Luftthermometer ausgespannten Platindraht hindurchgehen, so zeigt die Ausdehnung der Luft, event. auch das Glühen des Drahtes die thermische Wirkung der Ströme an. 9

Ist die inducirende Wirkung sehr gross, besteht namentlich die über eine inducirende Spirale gewundene Inductionsspirale aus sehr vielen Windungen und sind ihre Enden einander bis auf einen sehr kleinen Zwischenraum genähert, so entsteht beim Schliessen, noch besser beim 10

[1] Marianini, Bibl. univ. 51, p. 16*; Pogg. Ann. 27, p. 459, 1833*. — [2] Lenz, Pogg. Ann. 48, p. 385, 1839*.

Oeffnen des Stromes in der inducirenden Spirale ein Funken zwischen ihnen. Sind die Enden weiter von einander entfernt, und nähert man ihnen den Knopf eines Elektroskops, so geht bei Erzeugung der Inductionsströme Elektricität zu letzterem über, was anzeigt, dass sich die Enden der Spirale während der Induction mit freien Elektricitäten geladen haben, deren Art ganz der durch ein Galvanometer nachzuweisenden Richtung der Inductionsströme entspricht. — Besser zeigen sich diese Erscheinungen, wenn in den Spiralen Eisenkerne liegen (siehe weiter unten und in dem Capitel „Durchgang der Elektricität durch Gase).

11 Schaltet man endlich den menschlichen Körper durch zwei an den Enden der Leitung angebrachte metallene Handhaben, welche man mit den Händen ergreift, in den Schliessungskreis der Inductionsströme ein, welche z. B. durch den du Bois'schen Schlittenapparat erzeugt werden, so erhält man Erschütterungen, so dass die Inductionsströme auch physiologische Wirkungen ausüben.

Auch schon durch das Zuströmen von Elektricität zu den Enden der geöffneten Inductionsspirale können physiologische Wirkungen hervorgerufen werden, wie E. du Bois-Reymond[1]) gezeigt hat.

Verbindet man den Nerv eines präparirten Froschschenkels mit dem einen Ende eines Inductionskreises und leitet entweder den Schenkel oder das andere Ende des Kreises zum Erdboden ab, so zuckt jedesmal der Schenkel, wenn durch irgend ein Mittel in dem Kreise eine elektromotorische Erregung inducirt wird, die bei völliger Schliessung einen Inductionsstrom in ihm erregen würde. Diese Zuckungen treten auch ein, wenn der Nerv unterbunden oder durch einen feuchten Papierstreif mit dem Ende des metallischen Leiters verbunden wird. Sie zeigen sich, mag nun der Inductionsstrom durch eine doppelte Drahtrolle mit oder ohne Eisendrahtbündel oder eine Magnetelektrisirmaschine erzeugt werden. E. du Bois-Reymond bezeichnet diese Zuckungen mit dem Namen der unipolaren Inductionszuckungen.

Sind beide Enden des Inductionskreises sehr vollständig isolirt, so tritt keine Zuckung des Froschschenkels ein.

Da ein Froschschenkel einige Zeit nach dem Tode vorzüglich bei dem Beginn eines in seinem Nerven absteigenden, und auch bei dem Aufhören eines in demselben aufsteigenden Stromes zuckt, nicht aber, oder sehr viel schwächer beim Aufhören des absteigenden und Beginn des aufsteigenden Stromes, so kann ein solcher Schenkel zur Bestimmung der Richtung der Elektricitätsbewegung in der geöffneten Inductionsspirale dienen. Es ergiebt sich dann, dass die Bewegungen der freien Elektricitäten nach den Enden des ungeschlossenen Inductionskreises hin

---

[1]) E. du Bois-Reymond, Fortschritte der Physik, 1845, p. 538*; Untersuchungen, 1, p. 429*.

dieselben sind, welche bei völliger Schliessung des Kreises den jedesmal in ihm inducirten Strom hervorrufen würden.

Werden die Enden des Inductionskreises durch einen schlechten Leiter, z. B. einen 30 mm langen Streifen von feuchtem Fliesspapier, verbunden, und wird der Nerv des Froschschenkels auf irgend eine Stelle des Streifens gelegt, so zuckt der Muskel stets, da der Inductionsstrom einen Theil des Nerven direct durchfliesst. Wird der Nerv aber zwischen dem Muskel und dem Papierstreifen unterbunden, so zuckt der Muskel nur bei Ableitung des Schenkels. Ein geeignetes Froschpräparat zeigt dann in der Halbirungslinie der Länge des Papierstreifens keine Zuckung, und zwei solche, auf beide Hälften desselben gelegte Präparate zucken abwechselnd bei Umkehrung der Richtung des Inductionsstromes, und zwar um so stärker, je weiter ihre Nerven von der Halbirungslinie entfernt sind. Es wird hierdurch nachgewiesen, dass auf dem Schliessungskreise des Inductionsstromes eine Vertheilung der freien Elektricität stattfindet, welche der in dem Schliessungskreise einer Hydrosäule völlig analog ist.

Wir werden diese verschiedenen Wirkungen der Inductionsströme erst näher betrachten können, wenn wir von ihrer Zeitdauer gesprochen haben.

12 Ganz ähnliche Erscheinungen wie beim Entstehen und Vergehen des Stromes in dem inducirenden Draht A erhält man, wenn man denselben dem mit dem Galvanometer verbundenen Draht B nähert oder ihn von demselben entfernt. Man kann hierbei sowohl geradlinige, als auch im Zickzack gebogene Drähte, wie auch Bandspiralen verwenden oder sich zweckmässig des Fig. 1 gezeichneten Schlittenapparates bedienen.

Leitet man durch die inducirende Spirale A einen Strom von constanter Intensität, so schlägt die Nadel des mit der Inductionsspirale B verbundenen Galvanometers jedesmal aus, wenn man die Spirale B an A heranschiebt oder von A entfernt; sie kehrt aber nach dem Aufhören dieser Bewegung sogleich in ihre Ruhelage zurück. — Die Richtung des Ausschlages ergiebt, dass der beim Nähern inducirte Strom in den dem ruhenden Draht A parallel liegenden Theilen des bewegten Drahtes B dem inducirenden Strome entgegengesetzt gerichtet ist; dass beim Entfernen der inducirte Strom dem inducirenden gleichgerichtet ist.

Statt die Spirale B zu bewegen und A ruhen zu lassen, hätte man eben so gut die vom Strom durchflossene Spirale A an die jetzt ruhende Inductionsspirale B heranbringen oder von ihr entfernen können und hätte dieselben Resultate erhalten. Es kommt hierbei nur auf die relative Bewegung des inducirenden, vom Strome durchflossenen, und des inducirten Leiters an.

13 Man kann auch die Leiter des inducirenden und inducirten Stromes gegen einander in irgend einer Weise drehen, so dass dabei, wenn durch

beide Ströme flössen, ihre elektrodynamische Wirkung auf einander sich änderte. Man erhält auch dann inducirte Ströme, deren Richtung, ebenso wie die der in §. 12 erwähnten Ströme, sich am einfachsten durch folgenden, von Lenz[1]) ausgesprochenen Satz festhalten lässt:

Wird die relative Lage zweier Leiter A und B, durch deren ersten A ein Strom fliesst, geändert, so wird in B ein Strom von der Richtung inducirt, dass er durch seine elektrodynamische Wirkung auf den inducirenden Strom in A den Leitern eine Bewegung ertheilen würde, welche der Bewegung, durch welche sie die inducirende Wirkung vollbringen, gerade entgegengesetzt wäre.

Halten wir nur das Beispiel des §. 12 fest. In demselben wird in einem Draht beim Nähern eines vom Strom durchflossenen parallelen Drahtes ein Strom inducirt, der dem inducirenden entgegengesetzt ist, welcher also durch seine abstossende Wirkung auf den inducirenden Strom die Leiter von einander entfernen würde. Umgekehrt wird beim Entfernen der Leiter von einander ein dem inducirenden gleichgerichteter Strom erzeugt, der also die Leiter einander nähern würde.

Ebenso verhält es sich bei folgendem Beispiel.

Verbindet man einen kreisförmigen Leiter a von mehreren (etwa 20) Windungen mit den Polen einer Säule und stellt einen ganz ähnlichen zweiten kreisförmigen Leiter b, dessen Enden mit dem Galvanometer verbunden sind, in der Weise in ihn hinein, so dass ihre Ebenen einen Winkel von 90° mit einander machen, so entsteht in dem Leiter b ein inducirter Strom, wenn die Leiter so gedreht werden, dass ihre Ebenen zusammenfallen. Die Richtung dieses Stromes ist der des Stromes im Leiter a entgegengesetzt, so dass also die elektrodynamische Wirkung zwischen dem inducirten und inducirenden Strom die einander genäherten Leiter a und b von einander entfernen würde. — Dreht man die in einer Ebene befindlichen Leiter so, dass ihre Ebenen wieder einen Winkel von 90° machen, so entsteht umgekehrt ein dem inducirenden gleichgerichteter Strom im Leiter b[2]).

Diese Versuche kann man auch mittelst des §. 3 beschriebenen Apparates mit der Abänderung von Bowditch anstellen.

14 Inducirte Ströme können auch durch Einwirkung eines Magnetes auf einen Stromleiter entstehen. Dies hat Faraday (l. c.) zuerst gezeigt. Man kann, um ihre Richtung zu bestimmen, an Stelle des Magnetes die Molecularströme setzen, welche um die einzelnen Theile desselben in gewissen Richtungen circuliren.

---

[1]) Lenz, Pogg. Ann. 31, p. 483, 1834*. Schon früher hatte Ritchie (Phil. Mag. [3] 4, p. 11, 1834*; Pogg. Ann. 31, p. 203*) diese Beziehung aufgefasst, indess, wie Poggendorff (l. c.) bemerkt, die Bewegungsrichtungen umgekehrt angegeben. — [2]) Lenz, l. c.

Die Inductionsströme, welche in einem Leiter hervorgerufen werden, wenn in seiner Nähe plötzlich ein Magnet entsteht oder der Magnetismus desselben plötzlich wieder vernichtet wird, lassen sich z. B. in folgender Art nachweisen. Man umwindet einen als Anker eines hufeisenförmigen Stahl- oder Elektromagnetes dienenden Stab von weichem Eisen mit einer Spirale von langem, dünnem, übersponnenem Kupferdraht und legt die von der Ueberspinnung befreiten Enden desselben quer über einander [1]), oder lässt noch besser das eine Ende in eine kleine, schwach amalgamirte Kupferplatte endigen und stellt das andere, zugespitzte und gleichfalls amalgamirte Ende des Drahtes der Spirale federnd auf die Platte auf [2]). Im Moment des Abreissens des Ankers vom Magnet vibriren die über einander gelegten Drahtenden oder die Spitze und Platte; zugleich verschwindet der Magnetismus des Ankers und in der umgebenden Spirale entsteht ein Strom. Hierdurch springt zwischen beiden Enden der Leitung ein Funken über. — Selbstverständlich erhält man bei Anwendung natürlicher Magnete von Magneteisenstein dieselben Resultate [3]).

Legt man in die Drahtspirale des §. 3 beschriebenen Apparates oder des Schlittenapparates von E. du Bois-Reymond einen massiven, oder aus einem Bündel von Eisendrähten gebildeten Eisenkern ein, so sind die Inductionsströme beim Schliessen und Oeffnen des Stromes in der inducirenden Spirale viel stärker, als ohne den Eisenkern, da sich die durch die Aenderung des Magnetismus des letzteren inducirten Ströme zu den beim Oeffnen und Schliessen der Ströme in der inducirenden Spirale selbst erzeugten addiren.

Verbindet man die Enden der auf den Anker gewundenen Inductionsspirale mit einem Galvanometer, so zeigt der Ausschlag seiner Nadel an, dass beim Abreissen des Ankers in der Spirale ein Inductionsstrom erzeugt wird, welcher den Molecularströmen des magnetischen Ankers gleichgerichtet ist. Legt man den Anker wieder an den Magnet an, so erkennt man an der Ablenkung der Nadel einen seinen Molecularströmen entgegengesetzt gerichteten Inductionsstrom [4]).

Man braucht bei diesen Versuchen den Anker nicht völlig auf den Magnet aufzulegen und von ihm abzuheben; es genügt, seinen Magnetismus zu ändern, indem man ihn aus einiger Entfernung den Magnetpolen nähert und wieder von ihnen entfernt. — Auch kann man den Magnet selbst mit einer Drahtspirale umwickeln. Da sich auch in ihm beim Anlegen und Entfernen des Ankers der Magnetismus temporär ändert, so werden auch in diesem Falle in der Spirale inducirte Ströme erzeugt [5]).

---

[1]) Strehlke, Pogg. Ann. **25**, p. 186, 1832*. — [2]) Faraday, Exp. Res. **2**, p. 169*; Pogg. Ann. **25**, p. 187, 1832*. — [3]) Forbes, Phil. Mag. [3] **1**, p. 49, 1832*. — [4]) Nobili und Antinori, Antologia di Firenze No. CXXXI; Pogg. Ann. **24**, p. 473, 1832*. — [5]) Vergl. auch Pohl, Pogg. Ann. **24**, p. 495, 1832*.

15 Ebenso erhält man Inductionsströme, wenn man den mit einer Spirale umwundenen Anker auf einen Elektromagnet legt und den den letzteren erregenden Strom abwechselnd öffnet und schliesst. Ein mit der Spirale verbundenes Galvanometer zeigt dabei die abwechselnd gerichteten Inductionsströme an. Dasselbe ergiebt sich, wenn man einen geschlossenen Eisenring an einer Stelle mit der Magnetisirungsspirale, an einer anderen Stelle mit der Inductionsspirale umgiebt [1]).

Schon durch einen einzelnen Magnetoinductionsstrom dieser Art kann man einen weichen Eisenstab temporär magnetisiren. Legt man an einen Elektromagnet einen mit Draht umwickelten Anker und verbindet die Enden des Drahtes mit einer Spirale, in der sich ein weicher Eisenstab befindet, unter welchen Eisenfeilen gestreut sind, so richten sich letztere jedesmal auf, wenn man den den Elektromagnet erregenden Strom vermittelst eines Gyrotrops umkehrt [2]).

Schaltet man in den Schliessungskreis des um einen Elektromagnet geleiteten Stromes einen Platindraht ein, der dabei dunkelrothglühend wird, so wird derselbe beim Abreissen des Ankers weissglühend, beim Auflegen aber dunkler; indem im ersten Falle der Magnetismus geschwächt, im zweiten verstärkt wird und so in der den Magnet umgebenden Spirale Ströme inducirt werden, die den Molecularströmen im Magnet oder dem magnetisirenden Strome selbst gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind. Dasselbe geschieht, wenn der Strom noch ein in einer Spirale befindliches Eisendrahtbündel umkreist und letzteres plötzlich entfernt oder wieder in die Spirale eingeführt wird [3]).

16 In ganz gleicher Weise erhält man in einer Spirale Inductionsströme, wenn man dieselbe über eine zweite, von einem constanten Strom durchflossene Spirale hinüberschiebt und in letztere plötzlich einen Eisenkern einführt. Ihre Richtung entspricht ganz der oben gemachten Angabe.

Wie der Eisenkern wirkt, wenn auch schwächer, durch seine temporäre Magnetisirung ein Stab von Nickel oder Kobalt.

Man kann auch beim Einschieben diamagnetischer Metalle in die Spiralen nachweisen, dass die dabei entstehenden Inductionsströme durch die Aenderung des Diamagnetismus der Metalle wirklich bedingt sind. Die meisten hierauf bezüglichen Versuche ergaben indess Ströme, welche durch die Induction von Strömen in den Massen der diamagnetischen Metalle selbst und die Rückwirkung dieser Ströme auf die in der Nähe befindlichen Inductionsspiralen inducirt waren, und welche eine so bedeutende Intensität im Verhältniss zu den etwa durch diamagnetische Polarisirung der Metalle inducirten Strömen besassen, dass der Einfluss der letzteren nur schwierig wahrgenommen werden konnte [4]).

---

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 1, §. 27 u. flgde*. — [2]) Dove, Pogg. Ann. 29, p. 461, 1833*. — [3]) Daniel, Compt. rend. 69, p. 367, 1867*. — [4]) Faraday, Exp. Res. Ser. 23, 1850*, vergl. Bd. III, §. 936 u. f.

Dass in allen diesen Versuchen die inducirte Spirale durch eine einzige Drahtwindung oder auch nur durch einen, zu derselben tangential gerichteten geraden Draht ersetzt werden kann, folgt schon aus der Analogie mit den §. 2 beschriebenen Versuchen. Indess sind dann die Inductionsströme meist so schwach, dass sie nur mit empfindlichen Galvanometern nachzuweisen sind.

17 Legt man, um noch ein weiteres Beispiel anzuführen, vor den einen Pol *N* eines Magnetstabes eine Spirale mit ihrer Axe senkrecht gegen die des Stabes und schiebt das Ende *a* eines Eisenstabes *acb* in die Spirale bis zum Pol *N*, so erhält man einen Inductionsstrom, indem der Eisenstab von *N* bei *a* einen Südpol, an dem ausserhalb gelegenen Ende einen Nordpol erhält. Schiebt man den Stab bis zu seiner Mitte *c* in die Spirale ein, so kehrt sich die Polarität der Hälfte *ac* desselben um, während die magnetische Polarisation der Theilchen zwischen *c* und *b* kleiner wird, als vorher zwischen *a* und *c*. Man erhält einen dem ersten entgegengerichteten Inductionsstrom. Schiebt man den Stab in gleicher Richtung weiter vor, bis das Ende *b* vor dem Pole *N* steht, so nimmt der ganze Stab die entgegengesetzte Magnetisirung an, wie in der ersten Lage, man erhält einen noch stärkeren Inductionsstrom im gleichen Sinne wie in dem zweiten Falle[1]).

18 Auch wenn man die relative Lage eines Magnets und eines Leiters gegen einander ändert, wird in letzterem ein Strom inducirt.

Schiebt man z. B. in den inneren Raum einer mit dem Galvanometer verbundenen Spirale einen Stahlmagnet mit dem einen Pole ein, so erkennt man am Ausschlag der Nadel des Galvanometers, dass in der Spirale ein Strom inducirt worden ist, welcher den Molecularströmen des Magnetes entgegengesetzt gerichtet ist. Zieht man den Magnet plötzlich aus der Spirale heraus, so ist der Inductionsstrom jenen Molecularströmen gleichgerichtet. Denken wir uns daher die Drahtspirale mit ihrer Axe vertical aufgestellt, und schieben wir von oben her den Südpol eines Stahlmagnetes hinein, so circulirt der inducirte Strom (von oben betrachtet) durch die Windungen der Spirale in der Richtung der Bewegung des Uhrzeigers. Beim Herausziehen des Südpols circulirt der Strom in entgegengesetzter Richtung. Ersetzt man den Südpol des Magnetes durch seinen Nordpol, so kehren sich die Richtungen der inducirten Ströme um. — Schiebt man den Magnet ganz durch die Spirale hindurch, so ruft die Annäherung und Entfernung desselben in den einzelnen Windungen der Inductionsspirale gleiche und entgegengesetzt gerichtete Inductionsströme hervor, deren chemische Wirkungen z. B. sich gerade aufheben. Auch auf das Galvanometer wirken bei schneller Bewegung des Magnets die beiden Ströme zusammen nicht. — Wird

[1]) du Moncel, Compt. rend. **94**, p. 558, 1882*; Beibl. **6**, p. 510*.

der Magnet langsam in die Spirale eingeschoben oder aus ihr herausgezogen, so bemerkt man keine Ablenkung der Galvanometernadel. Obgleich die gesammte inducirte elektromotorische Kraft hierbei dieselbe ist, wie beim schnellen Bewegen des Magnetes, so ist doch die Zeit, in welcher sie erregt wird, gegen die Schwingungsdauer der Magnetnadel zu bedeutend, um dieselbe sichtbar zu bewegen [1]). — Wird über einen ruhenden Magnet eine Inductionsspirale geschoben, so zeigen sich die analogen Erscheinungen. Auch hier kann man, wenn auch mit viel geringerem Erfolg, die Drahtspirale durch einen zu ihr tangentialen, geraden Leiter ersetzen.

19 Eine sehr hübsche Art, schon durch sehr kleine Bewegungen eines Magnetes Inductionsströme zu erzeugen, ist von R. Grossmann [2]) angegeben worden. Ein 250 mm langer, 10 mm breiter und 3 mm dicker, stark magnetisirter Stahlstab wird in seiner Mitte in horizontaler Lage eingeklemmt. Unter sein eines Ende stellt man eine Inductionsspirale (z. B. die Inductionspirale des du Bois'schen Schlittenapparates) und verbindet dieselbe mit einem Froschpräparat. Wird das andere Ende des Magnetes durch Streichen mit einem Violinbogen in transversale [oder auch longitudinale [3])] Schwingungen versetzt, so werden in der Spirale abwechselnd gerichtete Ströme durch die Bewegungen des Magnetes inducirt, der Muskel des Froschpräparats wird tetanisirt. Wird der Magnet so gestrichen, dass er in mehreren Abtheilungen schwingt und dabei höhere Töne giebt, so bleibt der Muskel in Ruhe, da die Intensität der Inductionsströme geringer ist und dieselben vielleicht auch zu schnell auf einander folgen.

20 Auch bei diesen Versuchen kann man einen Funken durch den Inductionsstrom erhalten. Man bedient sich dazu einer kurzen, dicken, auf eine etwas längere Pappröhre *c*, Fig. 6, gewundenen Spirale *b*, deren eines Ende in einer Metallplatte *p*, deren anderes in einer auf die Platte aufstehenden Spitze *s* endet. In der Pappröhre befindet sich bei *a* ein Holzpflock. Wird der Magnet *m* in die Spirale schnell eingeschoben, so stösst er gegen den Holzpflock; dieser drückt gegen den Draht *ds*, und so wird im Moment des Entstehens des inducirten Stromes die Spitze von der Platte abgehoben, und ein lebhafter Funken erscheint [4]).

Fig. 6.

[1]) Vergl. auch Wartmann, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 19, p. 280, 1847*. — [2]) Grossmann, Bericht über die Versammlung der Naturforscher in Wien im Jahre 1856. Wien 1858, p. 221*. — [3]) Carney, Sillim. J. [3] 8, p. 203, 1874*. — [4]) Faraday, Phil. Mag. 5, p. 349, 1834*; Exp. Res. 2, p. 204*; Pogg. Ann. 34, p. 292*.

21 Verbindet man zwei parallel neben einander gestellte Spiralen so, dass ihre Windungen in entgegengesetzten Richtungen laufen, und schiebt in beide zugleich die beiden Schenkel eines hufeisenförmigen Stahlmagnetes ein, so addiren sich die in ihnen inducirten Ströme und man erhält stärkere Wirkungen, als bei Anwendung nur einer Spirale und eines geraden Magnetstabes [1]).

Verbindet man die Multiplicatoren zweier Galvanometer durch Leitungsdrähte und versetzt das astatische System des einen Galvanometers in Schwingungen, so geräth auch das astatische System des anderen in Schwingungen, selbst wenn die Galvanometer so weit von einander entfernt sind, dass eine directe magnetische Wechselwirkung ihrer astatischen Systeme auf einander nicht eintreten kann. Hier werden wiederum im Multiplicator des ersten Galvanometers durch die Schwingungen der Magnetnadel Ströme inducirt, welche den Multiplicator des anderen Galvanometers durchfliessen [2]).

22 Die bei der relativen Bewegung eines geschlossenen Leiters und eines Magnetes in ersterem inducirten Ströme lassen sich in ganz derselben Weise näher bestimmen, wie die inducirten Ströme, welche bei der relativen Bewegung zweier geschlossener Leiter entstehen, durch deren einen ein Strom fliesst, durch deren anderen nicht. Auch hier hat der inducirte Strom eine solche Richtung, dass die elektromagnetische Wirkung zwischen ihm und dem inducirenden Magnet dem letzteren und dem Stromesleiter die entgegengesetzte Bewegung ertheilen würde, wie die ist, durch welche die Induction hervorgebracht wird [3]).

Wird z. B. zwischen die gegenüberstehenden Halbanker eines hufeisenförmigen Magnetes eine flache Spirale gebracht, so dass die Ebene ihrer Windungen auf der axialen Verbindungslinie der Pole des Magnetes senkrecht steht, und dreht man die Spirale um eine gegen diese Linie senkrechte Axe um einen bestimmten Winkel herum, so wird dabei in der Spirale ein Strom inducirt, welcher den Molecularströmen an den beiden Polen des Magnetes gleichgerichtet ist, der also durch seine elektromagnetische Wirkung auf die Magnetpole die Spirale entgegen der ihr ertheilten Bewegung wieder in ihre erste Lage zurückführen würde. Hat man also den Nordpol des Magnetes zur Linken, so würden die inducirten Ströme in den oberen Theilen der Windungen der Spirale zum Beschauer hinfliessen. — Wird die Spirale aus der geneigten Lage in die erste Lage zurückgedreht, so ist die Richtung der Inductionsströme die umgekehrte.

---

[1]) dal Negro, Phil. Mag. 1, p. 45, 1832*. Faraday, Exp. Res. 2, p. 202*. — [2]) Fechner, Pogg. Ann. 45, p. 237, 1838*. — [3]) Lenz, Pogg. Ann. 31, p. 483, 1834*.

23 Durch die Bd. III, §. 509 beschriebenen, von mir angestellten Versuche ist bewiesen, dass jeder durch einen Eisenstab (oder ein Eisenrohr) hindurch gesendete Strom denselben transversal magnetisirt. Ist also in der Axe desselben isolirt ein Kupferdraht befestigt, so muss bei Umkehrung der Stromesrichtung durch die Umlagerung der magnetischen Molecüle des Eisenstabes im Kupferdraht ein Inductionsstrom erzeugt werden. Ein Bleirohr, in dessen Axe ebenso isolirt ein Kupferdraht befestigt ist, kann diese Wirkung nicht zeigen.

Ebenso müssen in dem Eisenrohr selbst Inductionsströme entstehen, wenn durch den isolirt durch seine Axe geführten Kupferdraht unterbrochene Ströme geleitet werden; in dem Bleirohr nicht.

Diese aus den früheren unmittelbar folgenden Resultate hat auch Villari[1]) durch Versuche an Eisen-, Blei- und Messingröhren bestätigt.

Dagegen ist die von einem Eisendraht in einem benachbarten Kupferdraht inducirte elektromotorische Kraft dieselbe, wie die in unmagnetischen Metallen inducirte Kraft. Es ist dies von vornherein klar, da der durch das Eisen geleitete Strom auf den diametral gegenüberliegenden Seiten desselben die Molecüle, von aussen gesehen, entgegengesetzt richtet und sich so die Wirkungen dieser entgegengesetzten Bewegungen auf den daneben liegenden inducirten Kreis aufheben. Ist der inducirte Kreis von Eisendraht, der inducirende z. B. von Kupfer, so kann auch hier keine Verstärkung eintreten, da dann zu beiden Seiten der Axe des Eisendrahtes die magnetischen Molecüle von der Axe aus gesehen entgegengerichtet werden, also auch hier die Inductionswirkung in Folge ihrer Drehung verschwindet.

Etwas anders gestaltet sich das Verhältniss, wenn eine Eisendrahtspirale in einer Spirale von unmagnetischem Metall, z. B. von Kupfer liegt. Wird durch die Kupferspirale ein Strom geleitet, so wird die Eisendrahtspirale als Ganzes wie eine Eisenröhre magnetisch; ihre magnetische Axe ist parallel ihrer geometrischen Axe. Hierdurch wird in jeder Windung der Eisendrahtspirale durch die benachbarten, longitudinal magnetisirten Theile derselben die Inductionswirkung der äusseren Kupferspirale gesteigert. Ebenso verhält es sich, wenn die Eisenspirale als inducirende Spirale dient. Der Strom in den Windungen macht die Spirale als Ganzes zu einem Magnet und diese Magnetisirung verstärkt die Inductionswirkung auf die umgebende Kupferspirale. Beim Oeffnen des inducirenden Stromes verschwindet diese Magnetisirung der Eisenspirale als Ganzes und die Oeffnungsinduction wird wiederum verstärkt.

Umgiebt die Eisenspirale die Kupferspirale und wird durch letztere der inducirende Strom geleitet, so wird die Eisenspirale als Ganzes nicht magnetisirt (vergleiche Bd. III, §. 550), und die Inductionswir-

---

[1]) Villari, Rendic. Lombardo. 15. Apr. 1869*.

kung auf sie ist die gleiche, wie auf eine Spirale von unmagnetischem Metall [1]).

In Flüssigkeiten werden auf gleiche Weise durch Magnete inducirte Ströme erzeugt, wie in metallischen Leitern. **24**

So wand Faraday [2]) um einen cylindrischen Eisenstab eine Kautschukröhre von 0,25″ Durchmesser und 8,5′ Länge in zwölf Umgängen. Die Röhre wurde mit verdünnter Schwefelsäure ($^1/_3$) gefüllt. Ihre Enden wurden durch Korke verschlossen, durch welche Kupferdrähte hindurchgingen, die mit den Enden des Drahtes des Galvanometers verbunden waren. Der so umwundene Eisenstab wurde als Anker auf einen Elektromagnet gelegt und der letzteren erregende Strom abwechselnd geschlossen und geöffnet. Hierbei wurden in der Flüssigkeit in der Röhre Ströme inducirt, welche die gleiche Richtung hatten, wie die Inductionsströme in einem in gleichem Sinne um den Eisenstab gewundenen Draht. Die von den Enden der Röhre zum Galvanometer gehenden Drähte waren so gelegt, dass in ihnen selbst beim Oeffnen und Schliessen des magnetisirenden Stromes keine Induction erfolgte. — Auch setzte Faraday unter einen Eisenstab, der als Anker auf einen Elektromagnet gelegt war, eine Schale voll sauren Wassers und senkte zu beiden Seiten des Stabes Platinplatten in dasselbe, welche mit dem Galvanometer verbunden waren. Hier entstand ebenfalls beim Erregen und Aufheben der Magnetisirung des Magnetes in der Flüssigkeit ein die Galvanometernadel ablenkender Inductionsstrom.

Auch durch Bewegung einer Flüssigkeit vor den Magnetpolen kann man in ihr Inductionsströme erhalten, wie J. A. Fleming (l. c.) gezeigt hat. **25**

Durch eine 200 cm lange, 2 cm weite, zwischen die Halbanker eines starken Elektromagnetes gestellte verticale Glasröhre, an deren Enden Platinelektroden angebracht waren, wurde ein Strom von verdünnter Schwefelsäure geleitet. Die Elektroden waren mit einem Galvanometer verbunden. Es zeigte sich ein Strom, der die Nadel des letzteren zuerst auf 10 bis 15° ablenkte und dann die Elektroden polarisirte. War der magnetisirende Strom geöffnet, so entstand kein Strom in der Flüssigkeit. In ein weites Becken wurden ferner am Rande flache Thonzellen, in der Mitte eine cylindrische gestellt, welche Kupferelektroden in Kupfervitriollösung enthielten. Das Becken war mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt und auf einen Pol des Elektromagnetes gestellt. Wurde die verdünnte Säure in Rotation versetzt, so zeigte das mit den Kupferelektroden ver-

---

[1]) Vergl. auch Villari, l. c. — [2]) Faraday, Phil. Mag. [4] 7, p. 265, 1854*; Pogg. Ann. 92, p. 299*. Auch Baxter, Edinb. J. 6, p. 25*; Fortschritte der Physik 1857, p. 394*; und nochmals J. A. Fleming, Proc. Roy. Soc. 26, p. 40, 1877*; Beibl. 1, p. 413*.

bundene Galvanometer einen inducirten Strom an. Analog kann man Inductionsströme in Flüssigkeitsstrahlen erhalten [1]).

b. Experimentelle Bestimmung der quantitativen Gesetze der Induction in linearen Leitern.

26 Neben den in den vorigen Paragraphen aufgeführten Gesetzen, welche die Richtung der inducirten Ströme bestimmen, sind die quantitativen Gesetze der soeben behandelten, einfacheren Fälle der Voltainduction und Magnetoinduction in linearen Leitern durch experimentelle Untersuchungen festgestellt worden.

Zuerst haben Lenz und Faraday die Gesetze der Magnetoinduction aufgesucht.

Lenz [2]) schob eine Spirale auf einen Cylinder von weichem Eisen, welcher als Anker von den Polen eines starken Stahlmagnetes abgerissen wurde. Der letztere war aus fünf Lamellen zusammengesetzt und trug etwa 22 Pfund. Die Intensität i der in der Spirale inducirten Ströme wurde an einem Galvanometer mit astatischer Nadel durch den ersten Ausschlag α derselben nach der Formel $i = const . sin \frac{1}{2}\alpha$ bestimmt. Durch Messung des Ausschlages an beiden Enden der Nadel wurden die durch ihre excentrische Aufhängung bedingten Fehler eliminirt. Auch wurde die Spirale abwechselnd in dem einen oder anderen Sinne auf den als Anker dienenden Eisenstab geschoben, und aus den beim Abreissen desselben beobachteten, entgegengesetzten Ablenkungen der Galvanometernadel das Mittel genommen.

Man erhielt gleiche Resultate, mochten die Windungen auf dem als Anker des Magnetes dienenden Eisenstab bis dicht an den Nordpol oder Südpol des Magnetes geschoben werden, oder in der Mitte beider verbleiben (vergl. Bd. III, §. 710).

Zuerst wurde ein langer Draht mit den Enden des Drahtes des Galvanometers verbunden; die mittleren Theile desselben wurden in 2 bis 20 Windungen um den Anker des Magnetes gewunden. Der Widerstand des Schliessungskreises blieb also ungeändert, die am Galvanometer abgelesenen Intensitäten entsprachen direct den in den Windungen auf dem Anker inducirten elektromotorischen Kräften.

So ergab sich unter Anderem:

Zahl der Windungen n	2	4	8	10	12	14	16	18	20
$sin \frac{1}{2}\alpha$	0,0491	0,1045	0,2156	0,2740	0,3319	0,3883	0,4470	0,4985	0,5594
$1/n . sin \frac{1}{2}\alpha$	0,0245	0,0261	0,0270	0,0274	0,0276	0,0277	0,0279	0,0277	0,0280

[1]) Morton, Proc. Glasgow Soc. **9**, Nr. 12, 1873, 1874*. — [2]) Lenz, Pogg. Ann. **34**, p. 385, 1835*.

Die elektromotorische Kraft, welche durch die Magnetoinduction in der den Anker umgebenden Spirale unter sonst gleichen Umständen erzeugt wird, ist also der Anzahl ihrer Windungen direct proportional.

Dasselbe Resultat ergab sich, als bei gleichbleibender Leitung zum Galvanometer die Anzahl der Drahtwindungen der Spirale auf dem Anker vermehrt wurde. Nur war hier die Intensität der erhaltenen Ströme noch mit dem Gesammtwiderstand der Schliessung zu multipliciren, um die der Windungszahl proportionale elektromotorische Kraft zu erhalten.

27 Ferner wurden um den als Anker dienenden Eisenstab, dessen Durchmesser 0,73″ betrug, entweder direct 6 bis 10 Drahtwindungen gelegt, oder dieselben in gleicher Anzahl auf runde Holzscheiben von 6,57″ und 28″ Durchmesser gewunden, welche auf dem Eisenstab befestigt waren. Da bei dem Abreissen des Ankers von den Polen des Hufeisenmagnetes durch die ungleichzeitige Entfernung der Windungen von denselben Störungen auftraten, wurden die ungleichnamigen Pole zweier gerader Systeme von Magnetstäben an die beiden Enden des Ankers gelegt und beide plötzlich abgerissen.

Die elektromotorischen Kräfte, welche aus den Ablenkungen der Nadel des mit den Windungen verbundenen Galvanometers berechnet wurden, schwankten nur im Verhältniss von 1 : 1,0838 oder 1 : 1,0107. Die elektromotorische Kraft der Induction ist also von der Weite der Windungen nahezu unabhängig.

28 Bei Anwendung von Spiralen, welche aus verschieden dicken Drähten gewunden waren, deren Querschnitte sich wie 233 : 839 : 1661 verhielten, war beim Abreissen des mit ihnen umwundenen Ankers von den Polen des Hufeisenmagnetes das Verhältniss der elektromotorischen Kräfte 1 : 1,00305 : 1,0085. Die elektromotorische Kraft ist von der Dicke der Drähte unabhängig.

Endlich wurden Spiralen aus Drähten von verschiedenem Metall, Kupfer, Eisen, Platin, Messing, gewunden und je zwei derselben hinter einander in einen das Galvanometer enthaltenden Schliessungskreis eingeschaltet. Die eine oder andere der Spiralen wurde auf den Anker des Magnetes geschoben und letzterer von den Polen desselben abgerissen. — In beiden Fällen blieb der Widerstand des Schliessungskreises ungeändert und ebenso der Ausschlag der Nadel des Galvanometers. Die elektromotorische Kraft ist also auch von dem Stoffe des Drahtes unabhängig.

Dieses Resultat ist schon früher von Faraday[1]) auf einem anderen Wege gefunden worden: Er umwand den Anker eines Hufeisenelektro-

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 198 bis 216, 1832*.

magnetes mit zwei parallelen, gleich langen Drähten von verschiedenem Material und verband ihre einen Enden so, dass die beim Abreissen und Anlegen des Ankers an den Magnet in ihnen inducirten Ströme einander entgegengerichtet waren. Die anderen Enden der Drähte wurden mit dem Galvanometer verbunden. Dieses letztere zeigt dann bei der Bewegung des Ankers keinen Strom an. — Auch wenn man den einen Draht durch einen mit Zinkvitriollösung gefüllten, mit amalgamirten Zinkelektroden versehenen Kautschukschlauch ersetzt, heben sich die Inductionswirkungen gerade auf[1]). Das soeben ausgesprochene Gesetz ist also bestätigt.

Die Intensität der Ströme indess, welche erhalten werden, wenn man den Anker mit gleichviel Windungen von verschiedenem Stoff und verschiedener Dicke umwickelt, ist umgekehrt proportional dem Widerstand des gesammten Schliessungskreises. Sie vermindert sich daher, wenn man statt eines Drahtes von Kupfer einen solchen von Messing, oder zusammengelöthete Stäbchen von Wismuth oder Antimon zur Inductionsspirale verwendet[2]).

29 Legt man mehrere Windungsreihen über einander auf den Anker des Magnetes, so nimmt entsprechend die inducirte elektromotorische Kraft zu; zugleich wächst aber auch der Widerstand, und zwar schneller als die Zahl der Windungsreihen, da jede folgende Reihe einen grösseren Umfang besitzt. Bei einem gegebenen Widerstand der äusseren Schliessung der auf den Anker gewundenen Spirale wird daher bei einer bestimmten Anzahl der Windungen die Stromintensität i ein Maximum.

Es sei der Radius des cylindrischen Ankers k, die Länge des auf ihm mit Draht umwundenen Raumes a, die gesammte Länge des Drahtes der Windungen l, die Dicke des Drahtes mit seiner Umspinnung $d + \delta$, die Zahl der neben und über einander liegenden Windungsreihen m und n, der Widerstand der Längeneinheit des Drahtes r, der Widerstand des Drahtes ausserhalb der Windungen w, die in jeder Windung inducirte elektromotorische Kraft E, so ist

$$i = \frac{m.n.E}{lr + w}.$$

Nun ist $m = a/(d + \delta)$, $l = [2nk + n^2(d + \delta)]\,\pi a/(d + \delta)$,

also: $$i = \frac{naE}{a\pi r\,[2nk + n^2(d + \delta)] + w(d + \delta)}.$$

Setzt man das Differential dieses Werthes nach n gleich Null, so erhält man das Maximum der Stromintensität, wenn:

$$n = \sqrt{\frac{w}{a\pi r}},$$

---

1) Vergl. Lud. Hermann, Pogg. Ann. **142**, p. 586, 1871*. — 2) Nobili u. Antinori, Pogg. Ann. **24**, p, 478, 1832*.

ist. Das Maximum der Stromintensität selbst ist:

$$i_m = \frac{E}{2\left(k\pi r + (d+\delta)\sqrt{\frac{\pi r w}{a}}\right)}.$$

Dieses Maximum ist also der elektromotorischen Kraft E, d. h. dem im Anker erzeugten Magnetismus proportional, und wächst mit der Länge a des umwundenen Theiles des Ankers; es nimmt ab mit dem Radius k des Ankers, der Dicke d, dem specifischen Widerstande r des Drahtes und dem Widerstand w der Leitung ausserhalb der um den Anker gelegten Windungen [1]).

30 Für die beim Oeffnen und Schliessen eines inducirenden Stromes erzeugte Voltainduction gelten im Allgemeinen dieselben Gesetze, wie für die Magnetoinduction, insofern sie von der Zahl der Windungen der Inductionsspirale und dem Stoff und der Dicke des zu ihr verwendeten Drahtes abhängt. Dies haben auch Felici und Gaugain gezeigt.

Felici [2]) wand um einen Cylinder von Holz von 248 mm Durchmesser einen Kupferdraht in einer Windung und verband seine Enden durch zwei übersponnene und um einander gedrillte Leitungsdrähte mit dem Galvanometer. Auf beiden Seiten dieses Drahtringes waren auf dem Cylinder zwei gleiche Ringe von Kupferdraht angebracht, durch welche der Strom einer Säule geleitet wurde. Ein Commutator diente dazu, in den beiden seitlichen, inducirenden Drahtringen den Strom abwechselnd zu schliessen und zu öffnen, und zugleich die Richtung der in dem mittleren Drahtring inducirten Ströme im Galvanometer gleich zu machen.

Beide inducirende Drähte wurden so gestellt, dass beim Durchleiten des Stromes durch dieselben in entgegengesetzter Richtung sich ihre Inductionswirkungen auf den mittleren Draht gerade aufhoben. Wurde der eine dieser Drähte durch ein Bündel von n dünneren, übersponnenen und parallel liegenden Drähten ersetzt, welche nur an ihren Enden leitend verbunden waren, so dass der Strom alle neben einander, und zwar jeden mit dem $n$ten Theil der Intensität durchfliessen musste, welche er in dem zweiten inducirenden Drahtring besass, so blieb die Gleichheit der inducirenden Wirkungen bestehen. — Wurde der eine der seitlichen Drähte statt von Kupfer, von Zink, Eisen u. s. w. gebildet, und wurden beide seitliche Drähte hinter einander in entgegengesetzter Richtung mit dem Galvanometer verbunden, durch den mittleren Draht aber der alternirende Strom der Säule geleitet, so hoben sich die inducirenden Wirkungen gerade auf. Dasselbe trat bei Ersetzung des einen Drahtes durch einen anderen von n fachem Querschnitt ein.

---

[1]) Lenz, l. c. — [2]) Felici, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 34, p. 64, 1852*

Die bei der Voltainduction inducirte elektromotorische Kraft ist also von dem Querschnitt und dem Stoff des Inductionsdrahtes unabhängig, und die Induction durch n Ströme von der Intensität I/n ist gleich der Induction durch einen Strom von der Intensität I.

31 Ersetzte ferner Felici den einen der beiden inducirenden Drähte durch einen, in engen Schlangenwindungen um ihn herumgelegten Draht, so hoben sich die Inductionswirkungen auf. Wie bei den elektrodynamischen Erscheinungen kann man also auch bei der Induction ein Element eines Leiters durch eine Reihe kleiner Elemente ersetzen, die aneinander liegend denselben Anfangs- und Endpunkt wie jenes Element haben, von ihm aber nur sehr wenig entfernt sind.

Wurden endlich auf zwei gleiche Holzcylinder in gleichem Abstand je zwei Spiralen von den Windungszahlen m und n so wie m_1 und n_1 gewunden, und die Spiralen m und m_1 als inducirende, die Spiralen n und n_1 als Inductionsspiralen verwendet, so hoben sich bei entgegengesetzter Verbindung der letzteren mit dem Galvanometer die in ihnen erregten Inductionsströme auf, wenn die Producte $mn = m_1 n_1$ waren.

Die elektromotorische Kraft der Voltainduction ist also dem Product der Windungszahlen der inducirenden und Inductionsspirale proportional.

32 Dann wurden auf drei Holzscheiben Drahtringe von 248 mm Durchmesser befestigt, deren Enden in der, dem verticalen Durchmesser entsprechenden Richtung nach unten geleitet wurden, so dass die Ringe die Gestalt Fig. 7 annahmen. Diese drei Ringe wurden so aufgestellt, dass ihre Mittelpunkte in einer geraden Linie lagen und ihre Ebenen darauf senkrecht standen. Durch die beiden äusseren Ringe wurde ein Strom in entgegengesetzter Richtung geleitet und der mittlere, mit dem Galvanometer verbundene Ring so lange verschoben, bis in ihm beim Oeffnen und Schliessen des Stromes in den äusseren Ringen kein Inductionsstrom entstand. In Folge der Gestalt des inducirten Ringes bildete sich auch ein solcher nicht, als die Ebene des mittleren Ringes auf denen der anderen Ringe senkrecht stand und der inducirende Stromkreis geöffnet und geschlossen wurde. — Blieb endlich der durch die äusseren Ringe geleitete Strom beständig geschlossen, und wurde der mittlere Ring von seiner letzterwähnten Lage aus um 90° herum in die parallele Lage gedreht, so entstand auch hier kein Inductionsstrom, obgleich dies in allen anderen Abständen des Ringes von den äusseren Ringen stattfand. Wird also der Leiter aus einer Lage, in welcher beim Oeffnen und Schliessen eines inducirenden Stromes in ihm kein Strom inducirt

Fig. 7.

wird, in eine andere derartige Lage übergeführt, so entsteht ebenso wenig ein Inductionsstrom, wie wenn er in der letzteren Lage verharrte und der inducirende Strom geöffnet und geschlossen würde.

Indirect kann man hieraus schliessen, dass, wenn ein Leiter aus einer Lage, in welcher in ihm durch inducirende Ströme kein Strom inducirt wird, in eine andere übergeführt wird, in ihm ein Inductionsstrom von gleicher Intensität entsteht, wie wenn er in letzterer Lage verharrte, und nun der inducirende Strom geöffnet und geschlossen würde.

Dieses Resultat lässt sich nach Felici[1]) directer in folgender Art nachweisen: Man stellt neben einem mit dem Galvanometer verbundenen Draht *A* zwei beliebig gebogene andere Drähte *B* und *C* auf, welche man mit den Polen einer Säule verbindet, und verschiebt dieselben so lange, bis beim Schliessen oder Oeffnen des durch sie hindurchgeleiteten Stromes in *A* kein Inductionsstrom entsteht, also die Galvanometernadel nicht abgelenkt wird. Entfernt man nach dem Schliessen des Stromes beide Drähte plötzlich aus der Nähe von *A*, so entsteht in letzterem wiederum kein Inductionsstrom. Ein solcher Strom entsteht aber beim Entfernen der Drähte *B* und *C*, wenn sich dieselben in Lagen befinden, in denen beim Schliessen und Oeffnen des durch sie hindurchgeleiteten Stromes in dem Drahte *A* ein Strom inducirt wird.

33 Endlich wurden zwei Holzcylinder von den Durchmessern 1 und 2 mit je zwei Drahtrollen umwickelt. Die Windungszahlen der einen derselben, der inducirten Kreise, waren einander gleich. Sie waren in entgegengesetzter Richtung mit einem Galvanometer verbunden. Die Windungszahlen der anderen beiden, inducirenden Kreise, durch welche der Strom einer Säule geleitet wurde, verhielten sich wie 2 (auf dem kleineren) zu 1 (auf dem grösseren Cylinder). Ihre Abstände von den inducirten Kreisen verhielten sich wie 1:2. Beim Oeffnen und Schliessen des inducirenden Stromes zeigte das Galvanometer keine Ablenkung.

Die von gleich grossen, parallelen und conaxialen Drahtkreisen auf einander ausgeübten Inductionswirkungen sind also proportional ihrem Durchmesser, wenn zugleich ihr Abstand in demselben Verhältniss wie ihr Durchmesser zunimmt.

Statt das Galvanometer anzuwenden, kann man bei den §. 31 bis 33 erwähnten Versuchen auch die inducirten Theile der gleich stark inducirend wirkenden Systeme hinter einander und mit einer kleinen Magnetisirungsspirale verbinden, in der eine Nähnadel liegt. Laufen die Inductionsströme der Systeme einander entgegengesetzt, so bleibt sie unmagnetisch [2]).

---

[1]) Felici, Nuovo Cimento 9, p. 345, 1859*. — [2]) Felici, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 39, p. 222, 1853*.

34 Bei den Versuchen von Gaugain[1]) wurden zwei mit Seide besponnene Kupferdrähte parallel neben einander befestigt, die Enden des einen mit der Säule, die des anderen mit dem Galvanometer verbunden, und der Inductionsstrom in letzterem beim Oeffnen und Schliessen des Stromkreises der Säule bestimmt, während die Drähte in einer verschiedenen Anzahl Windungen zu Spiralen gewickelt waren. Die Ablenkungen am Galvanometer ergaben unter Anderem folgende Intensitäten der inducirten Ströme:

Windungszahl:	1	2	4	15	30	80
Intensität:	3,5	6,17	10,66	28,55	29,87	28,86

Hiernach ist bei weiteren Windungen die elektromotorische Kraft des inducirten Stromes annähernd der Zahl der Windungen proportional. Ein allgemeineres Gesetz folgt indess aus diesen Versuchen nicht, da mit wachsender Windungszahl die diametral gegenüber liegenden Stellen der Windungen beider Drähte einander näher kommen und so stärker auf einander inducirend wirken, ohne dass die parallel neben einander liegenden Stellen derselben in gleichem Verhältniss stärkere Inductionswirkungen auf einander ausüben.

Bei anderen Versuchen hat Gaugain zwei verschieden dicke Drähte neben einander zu einer inducirenden Spirale gewunden und abwechselnd durch den einen oder anderen einen inducirenden Strom geleitet. Wurde dieser Spirale eine Inductionsspirale gegenübergestellt, deren Enden mit einem Galvanometer verbunden waren, und die Intensität des inducirenden Stromes durch Drahteinschaltungen auf derselben Höhe erhalten, so blieb auch die Intensität des inducirten Stromes constant. Dasselbe geschah, als die zweite Spirale als inducirende benutzt und der eine oder andere Draht der ersten mit dem Galvanometer verbunden wurde, während durch eingeschaltete Drähte der Widerstand der Schliessung constant erhalten wurde. Die elektromotorische Kraft des inducirten Stromes ist also von dem Querschnitt des inducirenden und inducirten Drahtes unabhängig.

Darauf wurden die Enden des einen Drahtes B einer mit zwei Drähten umwickelten Spirale mit dem Galvanometer, die Enden ihres anderen Drahtes A mit einer constanten Säule unter Einschaltung einer Tangentenbussole verbunden. Statt den Strom der Säule abwechselnd zu öffnen und zu schliessen, wurde bei Aufhebung ihrer Verbindung mit dem Draht A an die Stelle desselben ein entfernt liegender Draht von gleichem Widerstand in den Schliessungskreis der Säule eingeführt, um dadurch die während der Oeffnung der Säule etwa entstehenden Veränderungen ihrer elektromotorischen Kraft zu vermeiden. — Nach diesen Versuchen ist die elektromotorische Kraft des beim Oeffnen

[1]) Gaugain, Compt. rend. 39, p. 909, 1023, 1854*.

und Schliessen inducirten Stromes der Intensität des inducirenden Stromes direct proportional[1]).

35 Auch Lallemand[2]) hat gezeigt, dass die an einem Spiegelgalvanometer gemessene Intensität des Inductionsstromes in der einen Windungsreihe einer doppelt umwickelten Spirale beim Oeffnen und Schliessen des constanten Stromes in der zweiten Windungsreihe der an einem zweiten Spiegelapparat abgelesenen Intensität des letzteren proportional ist. War die Spirale ausser mit der inducirenden Windungsreihe, noch mit zwei gleichen Windungsreihen von Kupfer- und Messingdraht umgeben, so waren unter sonst gleichen Verhältnissen die Intensitäten der inducirten Ströme dem Gesammtwiderstand der Schliessung umgekehrt proportional, also die inducirten elektromotorischen Kräfte von dem Stoff des inducirten Drahtes unabhängig.

36 Die Gesetze der Induction in einem unendlich lang anzusehenden geradlinigen Leiter durch einen ebenfalls geradlinigen kurzen Leiter bei Aenderung der Stromintensität in letzterem sind von Buff[3]) experimentell geprüft worden. Der inducirte Leiter bestand aus einem grossen Viereck $EADCB$ von Kupferdraht, dessen obere Seite CD an der Decke des Zimmers, dessen untere AB auf einem horizontalen Brett befestigt war. Die Länge von AB und CD betrug 4 m, die Länge von BC und AD je 2,32 m. Die freien Enden des Vierecks waren mit einem Galvanometer mit starker und durch eine Kupferhülle in ihren Schwingungen gedämpfter astatischer Nadel verbunden.

Fig. 8.

Unter dem Draht AB befand sich als inducirender Leiter ein kleineres Viereck $abcd$ von 2,8 mm dickem Kupferdraht, dessen verticale Seiten bc und ad je 158 cm lang waren, und welches beliebig AB genähert und um seine verticale Axe gedreht werden konnte. In den Schliessungskreis der Vierecke waren zwei auf eine Axe aufgesetzte Zahnräder eingeschaltet, deren Zwischenräume mit Ebenholz ausgelegt waren. Durch Drehung der in geeignete Stellung zu einander gebrachten Räder konnte man den inducirenden Strom in $abcd$

[1]) Ein früher von Wartmann (Ann. de Chim. et de Phys. [3] 19, p. 257, 1847*) gefundenes Gesetz, nach welchem die Intensität der inducirten Ströme in arithmetischer Progression abnehmen sollte, während in den inducirenden Schliessungskreis Drähte eingeschaltet werden, deren Länge in geometrischer Progression zunimmt, ist nicht allgemein gültig. — [2]) Lallemand, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 2, p. 444, 1864*. — [3]) Buff, Pogg. Ann. 127, p. 57, 1866*.

in einer gegebenen Zeit beliebig oft unterbrechen und die bei der Oeffnung oder die bei der Schliessung in *ABCD* inducirten Ströme durch das Galvanometer leiten. — Wurde zuerst nur durch eine flache inducirende Spirale der Strom eines Bunsen'schen Elementes geleitet, dessen Intensität durch eingeschaltete Widerstände abgeändert und an einer Tangentenbussole abgelesen wurde, und mit dem Galvanometer eine der inducirenden gegenübergestellte Inductionsspirale verbunden, und wurden sodann durch Drehung der in beide Kreise eingeschalteten Zahnräder Inductionsströme in letzterer erzeugt, so ergab sich, dass die Intensität i der Inductionsströme, welche der Intensität I der inducirenden Ströme proportional sein musste, dem Werth $\sin \frac{1}{2} \alpha$ proportional war, wo α der Ablenkungswinkel der Galvanometernadeln ist. — Draht *AB* konnte gegen *ab* als unendlich lang angesehen werden. Die Inductionswirkungen von *ad* und *bc* heben sich hierbei gegenseitig auf; ebenso sind die Wirkungen von *ab* und *cd* auf *CD*, *CB*, *DA* und von *cd* auf *AB* wegen der grossen Entfernungen zu vernachlässigen, so dass nur die Wirkung von *ab* auf *AB* übrig bleibt.

Zuerst war die Seite *ab* parallel *AB*. Hierbei bestätigen die Versuche folgende Sätze:

1) Die in *AB* inducirte elektromotorische Kraft ist proportional der Länge s von *ab* ($s = 30$ und 60 cm; $i = 0{,}1411$ und $0{,}2811$).

2) Wurden in *AB* zwei je 180 cm lange und resp. 2,8 mm und 1,5 mm dicke Kupferdrähte oder ein Kupferdraht von 2,8 mm und ein Neusilberdraht von 2 mm Dicke hinter einander eingeschaltet, und abwechselnd der eine und der andere der Inductionswirkung von *ab* ausgesetzt, so erwies sich die inducirte elektromotorische Kraft gleich, also unabhängig von der Dicke und dem Stoff des inducirten Drahtes.

3) Wird an einer Stelle von *AB*, welche dem Draht *ab* fernliegt, ein Neusilberdraht eingeschaltet, so nimmt die Intensität des inducirten Stromes im Verhältniss zum Gesammtwiderstand des inducirten Kreises ab; die inducirte elektromotorische Kraft ist von letzterem unabhängig.

4) Wächst der Abstand r zwischen dem inducirenden Leiter *ab* und dem inducirten *AB*, so nimmt die inducirte elektromotorische Kraft e im Verhältniss von $e = I(a - b \log r)$ ab, wo a und b Constante sind und a die inducirte elektromotorische Kraft für $r = 1$ bezeichnet. So war z. B. die Ablenkung α der Galvanometernadel:

$r =$	1	2	3	4	5	6	8	10
α	11,85°	10,5°	9,45°	8,5°	7,95°	7,5°	6,95°	5,95°
α (ber.)	12	10°18′	9°15′	8°32′	7°58′	7°31′	6°48′	6°14′

Für die Berechnung ist $i = \sin \frac{1}{2} \alpha = 0{,}1046 - 0{,}05021 \log r$.

5) Steht der Leiter *ab* winkelrecht gegen die Ebene des Leiters *ABCD*, so übt er keine inducirende Kraft aus.

6) Liegt der Leiter *abcd* mit *ABCD* in einer Ebene, so dass *ad* und *bc* auf *AB* senkrecht stehen, *ab* aber gegen *AB* um den Winkel

φ geneigt ist, so ist die inducirte elektromotorische Kraft gegeben durch die Formel

$$E = Is \cdot \cos\varphi \left(\varkappa + \varkappa_1 \frac{r + s \sin\varphi}{s \sin\varphi} \log \frac{r}{r + s \cdot \sin\varphi} \right).$$

Um den Draht ab schräg zu stellen, war er um einen in a befestigten Stift drehbar und zugleich waren in a und b Charniere angebracht, durch welche ad und bc immer senkrecht gegen AB gestellt werden konnten. So ergab sich z. B.:

φ =	0°	10°	20°	30°	40°	50°
α =	22,5°	14,15	11,35	9,30	7,60	5,90
α (ber.)	22°30′	14°31′	11°28′	9°15′	7°23′	5°43′

7) Ein langer Draht acb (Fig. 9) wurde bei c mit einem Charnier versehen, und demselben ein Drahtviereck $rspq$, in welchem $rs = 0{,}6$ m, rp und sq sehr lang waren, in den Abständen $r = 1, 2, 3$ cm gegenübergestellt. Die bei Unterbrechung des Stromes in $rspq$ im Draht acb inducirte elektromotorische Kraft wurde bestimmt, einmal (I.) als seine beiden Hälften in derselben geraden Horizontalen lagen; sodann (II.) wenn die Hälfte cb vertical nach oben in der Fortsetzung von sq lag. Es war u. A.:

Fig. 9.

I.	r =	1	2	3
	α =	23	19,8	17,9
	α (ber.) =	23°0	19°39′	17°41
II.	r =	1	2	3
	α =	20,1	17,35	15,40
	α (ber.) =	20°22′	17°11′	15°16′

Die unter 4 bis 7 angeführten Resultate folgen unmittelbar aus der später zu entwickelnden Formel für die elektromotorische Kraft e, welche durch ein Element eines Leiters ds, in dem ein Strom von der Intensität I entsteht oder verschwindet, in einem Element dp eines benachbarten Leiters inducirt wird:

$$e = \frac{1}{2} I \varepsilon \int \frac{\cos(ds, dp)}{r} \, ds \, dp,$$

wo ε eine Constante, r die Entfernung der Elemente, $\cos(ds, dp)$ der Cosinus des Winkels zwischen den Elementen ist, und das Integral über alle Elemente ds und dp zu nehmen ist.

37 Die Gesetze der Induction eines Stromes in einem geschlossenen Leiter bei der Bewegung desselben neben einem von einem constanten Strom durchflossenen Leiter oder einem Magnet

sind von W. Weber[1]) experimentell vermittelst seines Dynamometers bestimmt worden. Die bifilar aufgehängte Rolle desselben (Bd. III, §. 47, Fig. 9) wurde zuerst für sich in Schwingungen versetzt, ohne dass durch die äussere feste Rolle ein Strom geleitet war, und die Weite ihrer auf einander folgenden Schwingungen an einer Scala bestimmt, welche in einem Abstand von 6018,6 mm vor dem an der Bifilarrolle befestigten Spiegel aufgestellt war. Der mittlere Ruhestand der Bifilarrolle blieb bei der Abnahme der Schwingungsbögen ungeändert, ebenso die mittlere Schwingungsdauer, welche 15,84865″ betrug. Die Differenz der Logarithmen des ersten und fünften, zweiten und sechsten u. ff. Schwingungsbogens, dividirt durch die Zahl der dazwischen liegenden Schwingungen, „das logarithmische Decrement" der Schwingungen blieb gleichfalls constant. Es betrug im Mittel bei 335 Schwingungen $d_0 = 0{,}002414$, während die grösste Abweichung von dem Mittel 0,000038 war. Im Mittel war also in 32 Min. 56,33 Sec. die Schwingungsweite auf die Hälfte herabgesunken. — Wurde durch die feste Rolle ein Strom von drei Grove'schen Elementen geleitet, während die Enden der Aufhängungsdrähte der Bifilarrolle mit einander verknüpft waren, so wurde bei jeder Schwingung der Bifilarrolle in ihr ein Strom inducirt, welcher dem Strom in der festen Rolle entgegengerichtet war, wenn die Windungen der Bifilarrolle sich dem Parallelismus mit denen der festen Rolle näherten; dagegen aber gleichgerichtet war, wenn sie sich von der parallelen Lage entfernten. So änderte sich die Richtung des inducirten Stromes von Schwingung zu Schwingung, und die Schwingungsweite der Bifilarrolle veränderte sich nach und nach. Der mittlere Stand derselben wird hierdurch aber nicht geändert. — Die Intensität des Stromes wurde an einem der festen Rolle direct gegenübergestellten Spiegelmagnetometer abgelesen, dessen Magnet durch den Strom in der Rolle abgelenkt wurde. Wurde wieder das logarithmische Decrement bestimmt, so ergab sich dasselbe im Mittel zu $d_1 = 0{,}00562$. Während die Schwingungsbogen bei 210 Schwingungen von 764,10 bis 50,08 abnahmen, die am Magnetometer beobachtete Stromintensität sich von 108,5 bis 109,4 änderte, differirte das logarithmische Decrement im Maximo von jenem Mittel doch nur um 0,000087. Nach diesen Beobachtungen war die Schwingungsweite jetzt in 14 Min. 8,187 Sec. auf die Hälfte herabgesunken.

Die Differenz der logarithmischen Decremente $d_1 - d_0$, welche mit und ohne Einwirkung des inducirenden Stromes erhalten werden, giebt die Grösse der inducirenden Wirkung des Stromes in der festen Rolle auf die Bifilarrolle.

Da die Differenz $d_1 - d_0$ bei verschiedener Weite der Schwingungsbogen constant ist, so folgt daraus, dass in Folge der Induction allein die Schwingungsbogen nach dem Gesetze einer geometrischen Reihe abnehmen. Die die Abnahme hervorbringende hemmende Kraft, d. h. die

[1]) W. Weber, Elektrodynamische Maassbest. 1, p. 61, 1846*.

Intensität der inducirten Ströme, ist also der Grösse der Schwingungsbogen, oder, da die Schwingungen isochron sind, der Geschwindigkeit der Bewegung des inducirten Drahtes der Bifilarrolle in jedem Moment proportional.

Dieses selbe Gesetz gilt, wie für die Induction eines geschlossenen Leiters auf einen geschlossenen Leiter, auch für die bei der Bewegung eines in sich geschlossenen Drahtes durch einen Magnet darin erzeugte Magnetoinduction. Dies hat Weber auf folgende Weise gezeigt: Vor den Oeffnungen der mit ihrer Axe von Nord nach Süd aufgehängten, in der festen Rolle des Dynamometers schwebenden Bifilarrolle wurden mehrere Magnetstäbe NS in der Lage von West nach Ost nördlich und südlich hingelegt, dass sie in jener Rolle bei ihren Schwingungen möglichst starke Ströme inducirten. Es wurde

1) Das logarithmische Decrement d_0 und d_m bestimmt, während die Bifilarrolle einmal geöffnet und sodann durch Verbindung der Aufhängungsdrähte geschlossen war. Die Differenz

$$\Delta_m = d_m - d_0 = 0{,}002638 - 0{,}002541 = 0{,}000097$$

ergab die dämpfende Wirkung der in der Bifilarrolle inducirten magneto-elektrischen Ströme.

2) Durch die Bifilarrolle wurde ein schwacher Strom geleitet. Der feste Stand der Rolle änderte sich um

$$k_m = 19{,}1 \text{ Scalentheile,}$$

welcher Werth das von den Magneten auf die vom Strom durchflossene Bifilarrolle ausgeübte elektromagnetische Drehungsmoment misst.

3) Nach Entfernung der Magnete wurde wiederum die Differenz $d_s - d_0$ der logarithmischen Decremente der Schwingungen der Bifilarrolle bestimmt, während durch die feste Rolle der Strom geleitet wurde und die Bifilarrolle geschlossen oder geöffnet war. Der Werth

$$\Delta_s = d_s - d_0 = 0{,}005423 - 0{,}002796 = 0{,}002627$$

entsprach der Wirkung der Voltainduction der festen Rolle auf die Bifilarrolle.

4) Endlich wurde auch durch die Bifilarrolle ein Strom von derselben Intensität wie ad 2 geleitet. Die Ablenkung

$$k_s = 101{,}9 \text{ Scalentheile}$$

gab das durch den Strom in der festen Rolle auf die vom Strom durchflossene Bifilarrolle ausgeübte elektrodynamische Drehungsmoment.

Nehmen wir an, dass die Intensitäten I_m und I_s der in der Bifilarrolle bei den Versuchen ad 1 und 3 inducirten Ströme der ad 2 und 4 beobachteten elektromagnetischen und elektrodynamischen Wirkung k_m und k_s proportional sind, so müssen die ad 1 und 3 gemessenen logarith-

mischen Decremente Δ_m und Δ_s den Producten $I_m . k_m$ und $I_s . k_s$, d. i. den Quadraten der Werthe k_m und k_s entsprechen.

Es verhält sich aber:

$$(k_m)^2 : (k_s)^2 = 1 : 28,5 \text{ und } \Delta_m : \Delta_s = 1 : 27,1.$$

Die durch einen Magnet in einem bewegten Leiter erzeugte Magnetoinduction ist also eben so gross, wie die von einem durch eine feste Rolle geleiteten Strom in ihm erzeugte Voltainduction, wenn die elektromagnetischen und elektrodynamischen Drehungsmomente gleich sind, welche durch den Magnet und durch die vom Strom durchflossene feste Rolle auf den von einem Strom von constanter Intensität durchflossenen beweglichen Leiter ausgeübt werden.

38 Wird in einer Inductionsspirale auf irgend eine Weise, sei es durch gewöhnliche oder elektromagnetische Induction, sei es durch Erzeugung des Extrastromes in ihr (s. w. u.), ein Inductionsstrom erregt, dessen Wirkungen auf einen ausserhalb befindlichen Körper untersucht werden sollen, so richtet man zweckmässig die Spirale so ein, dass der Inductionsstrom das Maximum der Intensität besitzt. Ist die Länge, der Durchmesser und die Dicke der Umwindung gegeben, so kennt man die Kupfermasse, welche zu dem Draht der Inductionsspirale verwendet werden kann. Wird dieser Draht n mal so lang genommen, also die Zahl der Windungen cet. par. der Spirale auf das $n$fache vermehrt, so ist die elektromotorische Kraft der Induction, welche der Zahl der Windungen entspricht, bei gleichbleibender inducirender Kraft auch die $n$fache. Zugleich nimmt bei gleichbleibender Kupfermasse der Widerstand des Drahtes wegen seiner Verlängerung auf das $n$fache, und ebenso wegen der Verringerung seines Querschnittes auf das $n$fache, im Ganzen also auf das n^2fache zu. Ist die elektromotorische Kraft der Induction bei einfacher Windungszahl der Inductionsspirale E, der Widerstand ihres Drahtes hierbei W, der Widerstand der Schliessung ausserhalb der Spirale w, so ist die Intensität I des Stromes bei der $n$fachen Windungszahl derselben:

$$I = \frac{nE}{n^2 W + w}.$$

Damit die Intensität dieses Stromes ein Maximum sei, muss

$$n^2 W = w$$

sein; d. h. die Spirale muss bei gleichbleibender Kupfermasse so angeordnet werden, dass ihr Widerstand dem Widerstand der übrigen Schliessung ausser ihr gleich ist. — Bei der Erzeugung von Funken und bei physiologischen Versuchen, zu welchen die Inductionsströme besonders verwendet werden, ist letzterer Widerstand meist sehr bedeutend, so dass man hierbei die Inductionsspiralen aus einem langen,

dünnen Kupferdraht winden muss. Bei galvanometrischen Versuchen, bei welchen man sich eines Galvanometers mit wenigeren Windungen bedient, formt man sie aus wenigeren Windungen von dickerem Drahte. Bei Anwendung verschiedener Inductionsspiralen kann daher bei der einen die physiologische Wirkung bedeutend, die galvanometrische gering sein, bei einer anderen dieses Verhältniss sich gerade umkehren, wie z. B. von Henry[1]) unter Anwendung verschiedener, aus übersponnenem Kupferdraht gewundener, cylindrischer oder aus schmalen Kupferstreifen gewundener Bandspiralen beobachtet wurde.

II. Induction durch die Erde.

39 Auch durch den Erdstrom lassen sich Inductionsströme erzeugen, wie Faraday[2]) zuerst dargethan hat.

Ein Rechteck von Kupferdraht, dessen Enden mit dem Galvanometer verbunden waren, wurde über dem letzteren hin- und herbewegt. Bei jeder Bewegung schlug die Nadel aus und zwar mit wechselnder Bewegungsrichtung des Rechtecks nach der einen oder anderen Seite. Es bezeichne $ABCD$, Fig. 10, die erste verticale Lage desselben. Seine Ebene falle mit der des magnetischen Meridianes zusammen, so dass die Seite AB in der magnetischen Nordsüdrichtung NS liege. Stellt dann OW den von Ost nach West auf der Erdoberfläche gerichteten Erdstrom vor, so wird beim Umlegen des Rechteckes nach West in die Lage ABC_1D_1 in demselben ein Strom inducirt, welcher dem Strom in eW entgegengerichtet ist, also in dem Rechteck von C_1 über D_1 nach A und B, d. h. in der unteren Seite desselben von Süd nach Nord fliesst. Wird dagegen das Rechteck von dieser geneigten Lage in die frühere verticale gebracht oder noch weiter nach Ost umgelegt, so kehrt sich die Stromesrichtung um; in der unteren Seite AB fliesst der Strom von Nord nach Süd.

Fig. 10.

Wird umgekehrt das Rechteck $ABCD$ um seine obere Seite CD hin- und herbewegt, so treten die umgekehrten Stromesrichtungen auf.

---

1) Henry, Pogg. Ann. Ergänz.-Bd. 1, p. 287, 1842*. — 2) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 171 bis 180, 1832*.

3*

Liegt das Rechteck *ABCD* nicht in der Ebene des magnetischen Meridians, sondern in einer anderen Lage, so zeigen sich analoge Erscheinungen. Es wird indess kein Strom inducirt, wenn das Rechteck parallel der Inclinationsrichtung fortbewegt wird.

40 In grösserer Intensität kann man diese Ströme erhalten, wenn man ein Drahtgewinde *a* (z. B. nach W. Weber[1]) eine Rolle von 718,3 mm Durchmesser und 120 mm Höhe, welche mit 542 m Kupferdraht von etwa 20 kg Gewicht umwickelt ist) an einem hölzernen Rahmen befestigt, der

Fig. 11.

an zwei diametral einander gegenüberstehenden Messingzapfen einmal in zwei vertical über einander liegenden Lagern um eine verticale, sodann auch in zwei horizontalen Lagern um eine der Ebene des magnetischen Meridianes parallele, horizontale Axe gedreht werden kann. Die Enden des Inductionsdrahtes werden durch zwei Klemmen mit dem Galvanometer verbunden. Eventuell kann auch die Spirale selbst als Multiplicator dienen, in welchem dann eine Magnetnadel schwebt (Fig. 11).

Bringt man die Spirale, während ihre Drehungsaxe vertical ist, in eine solche Lage, dass die Ebene ihrer Windungen auf dem magnetischen Meridian senkrecht steht, und dreht sie um 180° herum, so entsteht ein Inductionsstrom, welcher die Galvanometernadel ablenkt, und dessen Intensität durch diese Ablenkung bestimmt werden kann. — Wendet man ein Spiegelgalvanometer an, in welchem die Schwingungen der Nadel gedämpft werden, so kann man, wenn die Nadel ihre erste Schwingung vollendet hat, die Spirale plötzlich um 180° zurückdrehen und dieses

[1]) W. Weber, Abhandl. der K. Gesellschaft in Göttingen 5, p. 53, 1853*.

Umwenden derselben jedesmal wiederholen, wenn die Nadel durch ihre Ruhelage nach der einen oder anderen Seite hindurchgeht. Die Intensität I des bei jeder Drehung der Inductionsspirale inducirten Stromes bestimmt sich dann nach der Bd. III, §. 382 beschriebenen Multiplicationsmethode. Seine elektromotorische Kraft ist, wenn F der von den Windungen der Spirale umschlossene Flächenraum, P die Kraft des Erdmagnetismus, φ der Inclinationswinkel ist, $I = \varepsilon . FP . cos . \varphi$, wo ε die sogenannte Inductionsconstante ist (vergleiche das folgende Capitel). — Würde man die Spirale so stellen, dass ihre Windungen vor und nach der Drehung um 180° der Meridianebene parallel wären, so erhielte man keinen Inductionsstrom.

Bei der horizontalen Lage der Drehungsaxe bringt man die Ebene der Windungen in eine horizontale Lage und dreht sie so um 180°. Der nun inducirte Strom hat die Intensität $I_I = \varepsilon . F . P . sin \varphi$. Durch Division der beiden Werthe erhält man $I_I / I = tg \varphi$. Dies ist ein Mittel zur Bestimmung der Induction.

Die Richtung der Inductionsströme ist auch in allen diesen Fällen die gleiche, wie die Richtung eines durch die Leiter geschickten Stromes, der ihnen die entgegengesetzte Bewegung ertheilen würde, als die ist, welche man ihnen von aussen mechanisch mitgetheilt hat.

41 Indirect kann man durch den Erdmagnetismus stärkere Inductionsströme erzeugen, wenn man in Eisenstäben temporär den Magnetismus der Lage hervorruft, und dieselben dabei mit Inductionsspiralen umwickelt.

Hält man die Spirale mit dem Eisenkern so, dass ihre Axe mit der Richtung der Inclinationsnadel zusammenfällt, und kehrt sie plötzlich um 180° um, dass ihr unteres Ende zu oberst kommt, so entsteht in ihr ein inducirter Strom. Seine Richtung ist die gleiche, wie wenn ein bezeichneter (Nord-) Pol eines Magnetstabes von oben in die Spirale hineingeschoben worden würde. Auch wenn man an Stelle des Eisenstabes einen Stahlmagnet in der Spirale befestigt, entsteht beim Umkehren derselben ein Strom, hervorgebracht durch die Aenderung der temporären Magnetisirung des Stahls. Die entsprechenden Resultate erhält man, wenn die Spirale von vornherein so aufgestellt wird, dass ihre Axe mit der Richtung der Inclinationsnadel parallel ist, und man nun einen Eisenstab einschiebt. Derselbe wird magnetisch, so dass sein Nordpol nach unten gekehrt ist, und erzeugt in den Windungen der Spirale einen Strom, welcher den in ihm angenommenen Molecularströmen entgegengerichtet ist, der also in den nach oben gekehrten Hälften der Windungen der Spirale von West nach Ost fliesst. Beim Herausziehen des Eisenstabes aus der Spirale erhält man einen entgegengesetzten Inductionsstrom [1].

[1] Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 140 bis 147, 1832*; vergl. auch Nobili und Antinori, Antologia Nr. 131, Pogg. Ann. 24, p. 481, 1832*.

42 Um hierbei einen sichtbaren Funken zu erhalten, muss man die Intensität des Inductionsstromes bedeutend verstärken, wie dies zuerst von Palmieri und Santi Linari[1]) geschehen ist. Sie befestigten an einem Rahmen von Holz parallele Reihen von (10) 60 cm langen Stücken von Flintenläufen, deren Enden mit Eisenpflöcken verstopft, und die auf ihren ganzen Längen mit übersponnenem Kupferdraht umwickelt waren. Der Rahmen war an einer, gegen die Axen der Läufe senkrechten und in Lagern drehbaren, horizontalen Holzaxe befestigt, auf die zwei Kupferräder gesetzt waren, an welche die Enden der zu den Drahtwindungen der Flintenläufe führenden Leitungsdrähte angelöthet waren. Das eine dieser Räder war nicht unterbrochen, der Rand des anderen so ausgeschnitten, dass er nur zwei diametral gegenüber liegende Spitzen behielt. Beide Räder tauchten in ein Gefäss voll Quecksilber. Der Apparat wurde so gestellt, dass seine Drehungsaxe senkrecht gegen die Ebene des magnetischen Meridians lag, und nun der Rahmen mit den Flintenläufen um jene Axe gedreht. Waren die Spitzen des ausgeschnittenen Rades so gestellt, dass sie sich gerade aus dem Quecksilber hoben, wenn die Flintenläufe bei der Drehung ihre der Inclinationsrichtung parallele Lage verliessen, so dass also der Stromkreis der Spiralen geöffnet wurde, wenn die Aenderung des durch den Erdmagnetismus erzeugten Magnetismus der Flintenläufe, mithin die Intensität der inducirten Ströme im Maximum war, so beobachtete man im Dunkeln sichtbare Funken. Dieselben verschwanden, wenn das ausgeschnittene Rad um 90^0 gedreht wurde, weil dann bei der Unterbrechung der Inductionsstrom das Minimum der Intensität besass.

Bei diesem Apparat findet die Induction sowohl direct durch die Aenderung der Lage der Spiralen selbst, als auch namentlich indirect durch die Aenderung des Magnetismus der Flintenläufe statt.

Später ist es auch Palmieri[2]) gelungen, ohne Anwendung von Flintenläufen Funken durch die Erdinduction zu erhalten. Er ersetzte dabei den Rahmen mit den Flintenläufen durch einen elliptischen Holzrahmen, dessen Hauptaxen 1,2 m und 0,9 m betrugen, und der mit 200 Windungen von mit Seide übersponnenem Kupferdraht von 1,5 mm Dicke umwunden war. Derselbe war sonst ganz wie der Rahmen mit den Flintenläufen vorgerichtet und wurde um seine auf der Ebene des magnetischen Meridians senkrechte grosse Axe in Rotation versetzt.

---

[1]) Palmieri und Santi Linari, Compt. rend. **16**, p. 1442, 1843*; **18**, p. 762, 1844*; Pogg. Ann. **59**, p. 641* u. **62**, p. 285*. — [2]) Palmieri, Archives de Genève **5**, p. 190; Pogg. Ann. **67**, p. 244, 1846*.

III. Extraströme.

Wie ein in einer Drahtspirale entstehender oder verschwindender Strom in einer zweiten benachbarten Spirale einen Inductionsstrom hervorrufen kann, so inducirt auch das Entstehen und Vergehen eines Stromes in jeder einzelnen Windung einer Spirale in den benachbarten Stellen einen Strom, welcher sich mit dem ursprünglichen Strome vereint. Diesen inducirten Strom bezeichnet man mit dem Namen Extrastrom[1]), Nebenstrom, secundärer oder Gegenstrom[2]), oder auch wohl mit dem englischen Namen Extracurrent. Der Extrastrom ist bei der Schliessung des Stromkreises dem primären Strom in der Spirale entgegengerichtet. Er subtrahirt sich von demselben und vermindert in der ersten Zeit der Schliessung seine Intensität. Der beim Oeffnen des Stromkreises inducirte Extrastrom ist dem primären Strom gleichgerichtet, addirt sich daher zu ihm und vermehrt seine Intensität im Moment des Oeffnens[3]). Letzteren Strom nennt Moser auch den succedirenden Strom[4]). 43

Legt man in die Drahtspirale einen Eisenkern, so entsteht und verschwindet in demselben gleichzeitig mit dem Entstehen und Verschwinden des Stromes in der Spirale der temporäre Magnetismus. Hierdurch werden in der Spirale Inductionswirkungen in gleichem Sinne hervorgerufen, wie durch die Intensitätsänderungen des Stromes in ihr. Die Extraströme treten in Folge dessen viel stärker hervor, als ohne Anwendung des Eisenkernes.

Man kann die Existenz und die Wirkungen des beim Oeffnen des Schliessungskreises entstehenden Extrastromes folgendermaassen nachweisen: 44

Man verbindet den einen Pol einer Säule durch einen kurzen Draht mit einem Quecksilbernäpfchen, in welches der vom anderen Pole der Säule kommende Leitungsdraht taucht. Hebt man den Leitungsdraht aus dem Näpfchen, so erhält man einen schwachen Funken. Schaltet man aber in den Schliessungskreis noch eine aus einem langen, dünnen Draht gewundene Spirale ein, so erscheint in Folge des in derselben entstehenden Oeffnungs-Extrastromes beim Herausheben des Leitungsdrahtes aus dem Quecksilbernapf ein lebhafter Funken, obgleich jetzt der Widerstand in dem Schliessungskreis viel bedeutender ist, als vorher. Diese

---

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 9, 29. Jan. 1835*. Erste Beobachtung von Jenkins. — [2]) Jacobi, Pogg. Ann. 45, p. 134, 1838*. — [3]) Vergleiche auch dal Negro, Bibl. Univ. 2, p. 394, 1833; Nobili u. Antinori, Antologia Nr. 136; Pogg. Ann. 27, p. 436, 1833*. — [4]) Moser, Dove's Repert. 1, p. 330, 1837*.

Verstärkung des Oeffnungsfunkens zeigt sich, wie dal Negro (l. c.) zuerst beobachtet hat, namentlich bei Einlegen von Eisenkernen in die Spiralen oder beim Oeffnen des Schliessungskreises des einen Elektromagnet erregenden Stromes.

Bringt man an den, neben dem Quecksilbernapf befindlichen Enden der Leitung zwei metallene Handhaben an, welche man mit feuchten Händen fasst, so fühlt man beim Oeffnen des Stromkreises am Quecksilbernapf keinen Schlag, wenn derselbe aus einem kurzen Draht besteht, wohl aber, wenn er eine Spirale enthält. — Zur Anstellung dieses Versuches braucht man auch nur die mit Handhaben versehenen Enden der an den Polen einer Säule befestigten Leitungsdrähte mit feuchten Händen zu ergreifen, die Handhaben selbt an einander zu bringen und wieder von einander zu entfernen. Man erhält einen Schlag, wenn der Schliessungskreis eine grössere Drahtspirale enthält. Beim Einlegen eines Eisenkerns in die Spirale werden die Erschütterungen stärker.

Diese Beobachtungen wurden bei Anwendung einer einen Eisenkern enthaltenden Spirale von Jenkins und Masson[1]) im Jahre 1834 zuerst gemacht. Sie führten zunächst zur Entdeckung der Extraströme.

45 Will man eine Reihe von Erschütterungen durch den Extrastrom auf den Körper wirken lassen, so kann man den Fig. 12 gezeichneten Apparat verwenden. In demselben ist *k* die den Strom erregende Säule,

Fig. 12.

ss die Spirale, *a* und *b* sind die mit dem Körper verbundenen Handhaben, *u* ein in den Schliessungskreis eingeschalteter Stromunterbrecher (vergleiche Bd. I, §. 316). Die Handhabe *a* könnte ebenso gut auch an der Klemmschraube *c* angebracht werden, wo aber beim Oeffnen des primä-

[1]) Masson, Ann. de Chim. et de Phys. [2] 66, p. 6, 1837*.

ren Stromkreises noch die Säule *k* selbst in den durch den Körper geschlossenen Stromkreis des Extrastromes eingefügt bleibt. — Den Unterbrecher *u* kann man durch einen Wagner'schen Hammer oder auch nur durch eine eiserne Raspel ersetzen, deren eines Ende mit der Spirale *s* durch den Draht *d* verbunden wird, und auf welcher man mit dem von der Säule kommenden Leitungsdraht *e* entlang fährt.

Unterbricht man den Strom durch einen Interruptor immer schneller, so erreicht man endlich ein Maximum der physiologischen Wirkung; bei schnellerer Drehung nimmt dieselbe wieder ab [1]), indem dann während der jedesmaligen Schliessung der Schliessungsextrastrom noch nicht völlig abgelaufen ist, und so der Strom beim Oeffnen noch nicht das Maximum seiner Intensität erlangt hat (vergl. weiter unten).

46 Schiebt man während der Unterbrechungen des Stromes in die Spirale *ss* einen Eisenstab oder ein Bündel Eisendrähte ein, so werden die Erschütterungen viel stärker.

Um die physiologische Wirkung des Extrastromes bei Anwendung von Eisenkernen recht deutlich zu zeigen, kann man sich des mit dem Wagner'schen Hammer verbundenen Apparates, Fig. 13, bedienen.

Fig. 13.

Die Spirale *s* enthält einen aus dünnen Eisendrähten gebildeten Kern. Ihr eines Ende ist mit der Klemme *a*, ihr anderes mit der Metallschraube *b* verbunden, die unten in eine Spitze von Platin ausläuft. Gegen die letztere federt die an der Klemmschraube *c* befestigte Messingfeder *e*, auf welche unterhalb *b* ein Platinblättchen gelöthet ist, und die bei *d* einen eisernen Knopf trägt. Man steckt zwei Metallstifte, welche an Metallschnüren metallene Handhaben tragen, in besondere Löcher *g* und *f*, welche in die die Schraube *b* führende Metallfassung und die Klemmschraube *a* gebohrt sind, und ergreift die Handhaben mit den Händen. Werden die Klemmen *c* und *a* mit den Polen der Säule verbunden, so ist der Stromkreis derselben durch *cebsa* geschlossen. Der Eisenkern

[1]) Masson, Ann. de Chim. et de Phys. [2] 66, p. 6, 1837*.

der Spirale wird magnetisch, zieht den Knopf *d* an und öffnet dadurch den Stromkreis an der Schraube *b*. Der hierbei in der Spirale entstehende Extrastrom fliesst durch *f*, *s*, *b*, *g* und den menschlichen Körper. Nach dem Oeffnen des primären Stromkreises wird der Eisenkern der Spirale *s* wieder unmagnetisch. Die Feder *e* drückt den Knopf *d* von demselben ab und legt sich gegen die Schraube *b*, wodurch der Stromkreis von Neuem geschlossen wird [1]).

Bei diesen Versuchen beobachtet man nur die Wirkungen des Oeffnungsextrastromes, da der Schliessungsextrastrom sich erst nach der metallischen Schliessung der Kette bildet und so den schlechtleitenden menschlichen Körper kaum durchfliesst.

47 Um die Ablenkung der Nadel eines Galvanometers durch den Oeffnungsextrastrom zu erhalten, verbindet man die Pole einer Säule *zk*, Fig. 14, durch den Draht *zdabck*, in welchen bei *M* ein langer gerader oder zickzackförmiger Draht oder auch eine Drahtspirale eingefügt

Fig. 14.

werden kann, und vereint die Punkte *c* und *d* desselben durch einen Draht *cd*, in den bei *G* ein Galvanometer eingefügt ist. Die Nadel dieses Galvanometers würde in Folge des in der Richtung des Pfeiles fliessenden Stromes der Säule ausschlagen. Man hindert sie daran durch eine einseitige Hemmung [2]) (vergl. Bd. III, §. 278).

Besteht *M* aus einem geraden oder in Zickzackwindungen gebogenen Draht, und öffnet man die Schliessung z. B. bei *Z* mit Hülfe eines daselbst angebrachten Quecksilbernapfes, so entsteht in dem Draht *cMd* kein inducirter Strom, die Nadel des Galvanometers bleibt in Ruhe. Schaltet man aber in den Draht bei *M* eine Spirale von dünnem und langem Kupferdraht ein, so wird beim Oeffnen der Schliessung in dem Zweig *aMb* ein Extrastrom inducirt, welcher in gleicher Richtung fliesst, wie der verschwindende Strom, der also den jetzt geschlossenen Drahtkreis

[1]) Vergl. Neef, Pogg. Ann. 46, p. 104, 1839*. — [2]) Faraday, Exp. Res. Ser. 9, §. 1087, 1834*; bestätigt von Lenz und Jacobi, Pogg. Ann. 45, p. 139, 1838*.

aMbcGd in der Richtung *MadGc* durchläuft. In Folge dieses inducirten Stromes schlägt die Nadel des Galvanometers nach der Seite aus, auf welcher sie nicht gehemmt ist.

Man kann diesen Versuch auch ohne einseitige Hemmung der Nadel anstellen, indem man die Nadel, welche durch den primären Strom eine bestimmte Ablenkung erhalten, durch wiederholte Annäherung eines Magnetes um ihre neue Gleichgewichtslage in Schwingungen versetzt, welche gerade bis an den Nullpunkt der Theilung reichen. Oeffnet man den primären Strom in dem Augenblick, wo die Nadel von letzterem zur Gleichgewichtslage zurückzuschwingen beginnt, so weicht sie nun durch den Extrastrom nach der entgegengesetzten Seite aus. Dieser Versuch, welcher zuerst von Moser[1]), freilich mit einem negativen Resultat, angestellt worden ist, giebt nach Jacobi (l. c.) einen sehr deutlichen Beweis der Existenz des Oeffnungsextrastromes.

Auch der bei der Schliessung stattfindende Extrastrom lässt sich, wenn auch schwieriger, nachweisen, wie Faraday[2]) gezeigt hat.

Die Nadel des Galvanometers bei *G* in der Drahtverbindung, Fig. 14, wurde einseitig in der Weise gehemmt, dass der bei der Oeffnung der Schliessung entstehende Inductionsstrom sie nicht ablenken konnte, und die Intensität des primären Stromes so regulirt, dass die Nadel nicht bedeutend abgelenkt wurde. Wurde nun wieder bei *M* in den Stromzweig *bMa* vor dem Schliessen einmal ein gerader oder zickzackförmiger Draht, dann eine Spirale eingefügt, und der Stromkreis bei *Z* geschlossen, so war der erste Ausschlag der Nadel des Galvanometers im letzteren Falle viel bedeutender, als er durch den Einfluss des primären Stromes allein gewesen wäre. Bei der Schliessung war demnach in der Spirale bei *M* ein Extrastrom inducirt worden, welcher sich im Zweige *cd* zu dem primären Strom addirte, also im Kreise *MadGcb* in der Richtung *MbcGda* floss, die in der Spirale *M* dem primären Strom entgegengerichtet war.

Beim Einlegen von Eisenkernen in die Spiralen werden diese Wirkungen bedeutend gesteigert.

48 Um die chemische Wirkung des Extrastromes zu zeigen, bringt man an Stelle des Galvanometers *G*, Fig. 14, einen Apparat, bestehend aus einem auf einer Glasplatte liegenden Streifen von befeuchtetem Jodkaliumkleisterpapier, auf den man die Spitzen zweier mit den Enden der Leitung verbundener Platindrähte in einiger Entfernung von einander aufstellt. Man schaltet in den Zweig *cd* einen so grossen Widerstand ein, dass fast der ganze Strom der Säule durch Zweig *aMb* fliesst und die Zersetzung des Jodkaliums im Zweige *cGd* kaum bemerkbar ist. Oeffnet man nach Einschaltung einer, mit einem Eisenkern versehenen Spirale *M* in den Zweig *ab* den Schliessungskreis bei *Z*, so ent-

---

[1]) Moser, Dove's Repertorium 1, p. 336, 1837*. — [2]) Faraday, Exp. Res. Ser. 9, §. 1101 u. flgde. 1834*.

steht an dem einen Platindraht ein blauer Fleck, welcher nachweist, dass die Richtung des Oeffnungsstromes in *M* dem des verschwindenden primären Stromes gleich ist [1]).

Auch wenn man vor der Schliessung der Leitung bei *Z* das Jodkaliumpapier eingeschaltet hat, zeigt die Abscheidung des Jods an dem anderen Platindraht bei erfolgender Schliessung, dass nun der Schliessungsextrastrom dem primären Strom entgegengerichtet ist.

49 Der in einer Spirale erzeugte Oeffnungsextrastrom kann benutzt werden, um mittelst eines einfachen galvanischen Elementes Wasser zu zersetzen [2]). Zu diesem Zwecke schaltet man in den Schliessungskreis eines solchen Elementes *ZK*, Fig. 15, eine Inductionsspirale *J*, in welche man Eisendrahtbündel legt, und einen Wagner'schen Hammer *MA* ein. Man verbindet den Amboss *A* desselben, sowie einen Punkt *B* der Leitung zwischen der Spirale *J* und dem Hammer mit den Elektroden eines Voltameters *V*. Liegt der Hammer auf dem Amboss *A* auf, so ist der Stromkreis *ZJBMAK* geschlossen, und durch das Voltameter *V* fliesst wegen des grösseren Widerstandes nur ein geringerer Theil des Stromes. Dann wird durch den Magnet *M* der Hammer vom Ambos *A* abgehoben und der genannte Stromkreis geöffnet, so dass jetzt in *J* der dem primären Strome von *KZ* gleichgerichtete Oeffnungsinductionsstrom entsteht und mit letzterem zugleich durch das Voltameter *V* fliesst, wo nun durch die vereinte Wirkung beider das Wasser zersetzt wird. Darauf fällt der Hammer auf *A* wieder nieder, und der Process wiederholt sich.

Fig. 15.

Der Vortheil bei diesem Apparate ist nur der, dass im Moment des Oeffnens des primären Kreises die elektromotorische Kraft der Säule durch die des Extrastromes in der Spirale vermehrt wird, die Summe dieser Kräfte grösser ist, als die elektromotorische Kraft der Polarisation im Voltameter, und so das Wasser zersetzt wird. — Ganz selbstverständlich ist indess, dass die Zinkmenge, welche in der Säule verbraucht wird, sehr viel bedeutender ist, als wenn sie dem zersetzten Wasser äquivalent wäre, da der Strom der Säule beim Aufliegen des Hammers zum grössten Theil durch den letzteren und nicht durch das Voltameter fliesst und so nur zum geringeren Theil wirklich zur Wasserzersetzung beiträgt. Beim Oeffnen des Hammers, wo der Extrastrom mit dem pri-

[1]) Faraday l. c. — [2]) de la Rive, Arch. de Genève 3, p. 159*; Pogg. Ann. 60, p. 397, 1843*.

mären Strom zusammen das Voltameter und die Säule durchfliesst, werden in beiden Apparaten äquivalente Mengen Zink gelöst und Wasser zersetzt [1]).

Man hat diesen Apparat zuweilen mit dem Namen eines elektrochemischen Condensators bezeichnet.

Bringt man an Stelle des Galvanometers *G*, Fig. 16, einen ganz dünnen Platindraht und wählt den Draht *M* so dick, dass durch den den Platindraht enthaltenden Zweig *cd* nur ein sehr kleiner Theil des pri- 50

Fig. 16.

mären Stromes fliesst, so erglüht der Platindraht nicht, wenn der Stromkreis nicht unterbrochen wird. Sobald aber der Stromkreis bei *Z* wiederholt unterbrochen wird, erglüht der Platindraht in Folge des Extrastromes.

Schaltet man in den Apparat Fig. 16 bei *d* einen Commutator von der Form Bd. I, Fig. 323 ein, durch dessen Drehung der Strom im Zweige *ckzd* abwechselnd geschlossen und unterbrochen wird, und entsprechend durch *cd* nur die Schliessungs- oder nur die Oeffnungsströme hindurchgeleitet werden, so kann man diesen Versuch sehr gut zeigen. Es genügt dazu die Anwendung einer Spirale von etwa 130 mm Länge, 20 mm innerem Durchmesser und von etwa 500 Windungen aus 2 mm dickem Kupferdraht und einer Kette von etwa 4 Bunsen'schen Elementen. Bei Einlegen von Eisendrahtbündeln treten die Glüherscheinungen an dünnen Platindrähten von etwa $^1/_{12}$ mm Dicke und 10 bis 15 mm Länge auch bei den Schliessungsextraströmen sehr gut auf. Zur Schwächung des primären Stromes in dem den Platindraht enthaltenden Zweige *cd* ist es dabei zweckmässig, einen kleinen Wasserzersetzungsapparat mit platinirten Platinplatten in denselben einzuschalten.

Bei ununterbrochener Schliessung erglüht sodann der Draht nicht, wohl aber, wenn der Commutator nur die Schliessungsinductionsströme in die Nebenschliessung *dGc* eintreten lässt [2]).

[1]) Vergl. auch Despretz, Compt. rend. 44, p. 1009, 1859*. de la Rive, Arch. des siences phys. et nat. 35, p. 115, 1857*. — [2]) Buff, Pogg. Ann. 130, p. 302, 1867*.

51 Schaltet man in den Schliessungskreis einer Säule eine Spirale ein, welche aus zwei gleichen, parallel neben einander gewundenen Drähten besteht, und theilt den Strom der Säule zwischen beiden so, dass er beide in gleicher Richtung durchfliesst, so addiren sich die in jedem Draht beim Oeffnen des Stromes inducirten Extraströme, ebenso haben die von den Windungen des einen Drahtes in denen des anderen inducirten Ströme dieselbe Richtung. Man erhält also beim Oeffnen des Stromkreises einen starken Extrastrom und einen hellen Oeffnungsfunken. — Sind aber die beiden Drähte der Spirale so vereint, dass der primäre Strom beide Drähte in entgegengesetzter Richtung durchfliesst, so heben sich die in den Windungen jedes Drahtes, sowie die in dem einen Draht durch den anderen inducirten Ströme beim Oeffnen des Stromkreises auf; der Oeffnungsfunken ist nur schwach.

Ganz analog giebt ein Bündel von parallel neben einander liegenden, an ihren Enden mit einander verlötheten Drähten beim Einschalten in den Stromkreis einen stärkeren Oeffnungsfunken, wenn die Drähte nahe bei einander liegen, als wenn sie aus einander gebogen werden [1]. — Ein Draht von grösserer Dicke kann ebenfalls stärker wirken als ein dünnerer, indem jede vom Strom durchflossene Längsfaser in den benachbarten Fasern einen gleichgerichteten Oeffnungsstrom inducirt.

Entsprechend entsteht kein Oeffnungsfunken, wenn man einen Draht in der Mitte umbiegt, dass seine beiden Hälften parallel neben einander liegen, ihn so in verschiedene Formen bringt und seine Enden abwechselnd mit den Polen einer Säule verbindet und von derselben loslöst [2].

52 Die elektromotorische Kraft der Extraströme ist ebenso, wie die elektromotorische Kraft der übrigen Inductionsströme, im Allgemeinen von dem Stoff der Drähte unabhängig, in denen sie erzeugt werden. Nur wenn dieselben aus einem magnetischen Metall, z. B. aus Eisen bestehen, treten wesentliche Verstärkungen der Extraströme hervor. Da beim Durchleiten eines Stromes durch einen Eisendraht die magnetischen Molecüle sich um die Axe desselben im Kreise herum transversal lagern, induciren sie hierdurch einen, dem hindurchgeleiteten entgegengesetzten Strom, welcher sich zu dem Schliessungsextrastrom addirt. Beim Oeffnen des Stromes kehren die Molecüle mehr oder weniger in ihre unmagnetischen Lagen zurück und erzeugen dadurch einen dem Oeffnungsextrastrom gleichgerichteten Strom.

Während man an geradlinigen Drähten von unmagnetischen Metallen, wenn sie nicht sehr dick sind, kaum die Induction von Extraströmen wahrnimmt, welche von den in jeder Längsfaser der Drähte sich ändernden Strömen in den benachbarten Fasern inducirt werden, treten diesel-

[1] Faraday l. c. §. 1092*. — [2] Faraday l. c. §. 1098 u. flgde.*; vergl. auch Masson, Ann. de Chim. et de Phys. [2] 66, p. 5, 1837*.

ben in Folge der eben beschriebenen transversalen Magnetisirung an Eisendrähten stark hervor. Schaltet man daher in den Fig. 16 gezeichneten Apparat statt der Spirale *M* einen geraden Eisendraht ein, so erhält man ähnliche Wirkungen, wie bei Anwendung der Spirale [1]).

Die Abhängigkeit der Intensität der Extraströme von der Intensität der in der Inductionsspirale entstehenden und verschwindenden Ströme ist von Edlund [2]) studirt worden. 53

Der Strom einer Grove'schen Säule *S*, Fig. 17, von 2 bis 3 Elementen, wird durch die Leitungsdrähte *Sd* und *Se* geleitet, und in den Punkten *d* und *e* derartig verzweigt, dass seine Zweige durch die doppelten Windungen *ah* und *bf* eines Differentialgalvanometers *G* mit Spiegelablesung in entgegengesetzter Richtung fliessen. Bei *A* ist in die Leitung *da* eine Inductionsrolle *A* eingeschaltet, bei *k* in die Leitung *df* ein im Zickzack gewundener Draht von solcher Länge, dass die Widerstände der Schliessungskreise *dAahe* und *dkfbe* gleich sind. Der Draht *k* ist über zwei, 3 m von einander entfernte Glasstangen gewunden, und dann sind die einzelnen Windungen desselben zusammengebunden. Während dauernder Schliessung zeigt der Spiegel des Galvanometers keine Ablenkung, die Wirkungen der Ströme in beiden Zweigen heben sich gerade auf.

Fig. 17.

G a b h f e k A d l S

Wird der Schliessungskreis der Säule in einem Punkte *l* geöffnet, so entsteht in der Spirale *A* der dem Oeffnen entsprechende Extrastrom, welcher in der Richtung *dAahebfkd* fliesst und so in beiden Windungsreihen des Galvanometers den Magnet desselben in gleichem Sinne ablenkt. Aus dem Ausschlage kann man mit Rücksicht auf die Dämpfung der Schwingungen durch die ihn umgebenden Metallmassen die Intensität des Inductionsstromes berechnen.

Sind die den Magnet des Galvanometers ablenkenden Kräfte der beiden Stromkreise *dahe* und *ebfd* bei gleicher Intensität der sie durchfliessenden Ströme m und m_1, die Widerstände der Stromkreise r und r_1,

---

[1]) Vgl. auch Villari, Rendicont. Lombard. 15. April 1869*. — [2]) Edlund, Pogg. Ann. 77, p. 161, 1849*.

so ist, da ein in entgegengesetzter Richtung durch beide Kreise neben einander geleiteter Strom den Magnet nicht ablenkt:

$$\frac{m}{r} = \frac{m_1}{r_1} \quad \text{. . . . . 1)}$$

Ist die elektromotorische Kraft des beim Oeffnen der Säule in der Spirale A inducirten Extrastromes gleich E, so ist die Einwirkung dieses Stromes auf den Magnet:

$$A_0 = \frac{E}{r + r_1}(m + m_1) = \frac{Em}{r} \quad \text{. . . . . 2)}$$

Schliesst man nach dem Oeffnen den Stromkreis dSe wiederum bei l, so erhält man in der Spirale A den bei der Schliessung erzeugten Extrastrom, welcher sich zwischen den drei Stromkreisen $dahe$, $dfbe$ und dSe verzweigt. Ist die elektromotorische Kraft dieses Schliessungsextrastromes E_1, der Widerstand des Schliessungskreises dSe gleich R, so ist die Wirkung des so inducirten Stromes auf den Magnet des Galvanometers:

$$A_s = \frac{E_1 [m(r_1 + R) + m_1 R]}{r(r_1 + R) + r_1 R} \quad \text{. . . . . 3)}$$

oder, nach Gleichung 1):

$$A_s = \frac{E_1 m}{r} \quad \text{. . . . . 4)}$$

Die Wirkungen A_0 und A_s auf die Magnetnadel sind also unabhängig von dem Widerstande des die Säule enthaltenden Stromzweiges, welcher sich bei Anwendung verschiedener Säulen und im Laufe der Versuche ändert.

Die Versuche bieten insofern eine gewisse Schwierigkeit, als der Magnet des Galvanometers beim Oeffnen des primären Stromes sich nicht immer in der Gleichgwichtslage befindet, welche er ohne Einfluss desselben hätte, und so der inducirte Extrastrom in anderer Weise auf ihn wirkt, als in jener. Es lässt sich indess mit Hülfe der Bd. III, §. 333 angeführten Formeln dennoch die Intensität der Inductionsströme aus dem Ausschlag des Magnetes berechnen.

Mit Anwendung der gehörigen Vorsichtsmaassregeln ergab sich, dass bei gleicher Intensität der angewandten Ströme die beim Oeffnen und Schliessen erhaltenen Extraströme gleiche, aber entgegengesetzte elektromotorische Kräfte besitzen.

Die etwaigen Unterschiede zwischen der Theorie und Beobachtung folgen aus den durch die Polarisation in der Säule hervorgebrachten Aenderungen der Stromintensität, durch welche bei gleicher Stärke des angewandten Stromes die Intensität des Schliessungsstromes etwas vermehrt wird.

Ferner ist die elektromotorische Kraft E_1 des Extrastromes der Intensität I des primären Stromes direct proportional, wie dies auch folgende Tabelle ergiebt:

I	33,8	42,1	44,8	46,0	51,9	52,8
E_1 gef.	6,93	9,20	9,61	9,84	11,08	11,58
E_1 ber.	7,32	9,12	9,71	9,97	11,24	11,44
I	54,2	54,7	80,3	83,1	108,4	113,6
E_1 gef.	12,3	12,0	17,45	17,55	23,76	25,09
E_1 ber.	11,74	11,85	17,40	18,00	23,49	24,61

Aendert man die Intensität des inducirenden Stromes dadurch, dass man plötzlich grössere oder geringere Drahtlängen in den Stromzweig dSe einführt, so sind die Extraströme der jedesmaligen Aenderung der Stromintensität direct proportional.

Durch eine ganz analoge Methode ist Rijke[1]) zu demselben Resultat gekommen. Da die Abnahme der Stromintensität während der Schliessung des primären Stromes in Folge der Polarisation in der Säule den Oeffnungsstrom zu klein erscheinen lässt, so schloss Rijke die Säule nach der Lostrennung von der Verbindung mit der den Extrastrom gebenden Spirale mittelst eines geeigneten Commutators durch einen Draht von gleichem Widerstand, wie dem ihrer vorherigen Schliessung, und verband sie dann erst wieder zur Beobachtung des Schliessungsextrastromes mit letzterer. 54

Zur Messung der Intensität der Ströme diente ihm ein Ruhmkorff'sches Spiegelgalvanometer, welches dem Bd. III, pag. 290 gezeichneten ganz ähnlich ist. Die Ausschläge a seines Magnetes durch die Extraströme betrugen bei abwechselnder Richtung des primären Stromes:

1. beim Oeffnungsextrastrom . . $a = 18{,}74$ und $18{,}80$ (Mittel 18,77)
2. beim Schliessungsextrastrom . $a = 18{,}56$ und $19{,}06$ (Mittel 18,81)

Die Gleichheit der Intensität beider Ströme ist also bewiesen.

Dasselbe Resultat erhielt Rijke, als er in die Inductionsspirale ein Bündel Eisendrähte einlegte. Die Ablenkungen betrugen

1. beim Oeffnungsextrastrom . $a = 31{,}33$ und $31{,}73$ (Mittel 31,53)
2. beim Schliessungsextrastrom $a = 31{,}36$ und $31{,}75$ (Mittel 31,545)

Also auch beim Einlegen von Eisenkernen in die Inductionsspiralen sind die elektromotorischen Kräfte einander gleich, welche beim Oeffnen und Schliessen des dieselben durchlaufenden Stromes inducirt werden.

Dass die elektromotorische Kraft der Extraströme der Intensität des primären Stromes proportional ist, hat auch Buff[2]) bewiesen. Er be- 55

[1]) Rijke, Pogg. Ann. 102, p. 481, 1857*. — [2]) Buff, Pogg. Ann. 130, p. 337, 1867*.

diente sich im Wesentlichen des Fig. 18 abgebildeten Apparates. In den Zweig *cksd* wurde ausser der Säule (einiger Bunsen'scher Elemente) noch ein Rheostat und eine Tangentenbussole eingeschaltet, in den Zweig *cGd* neben dem Galvanometer oder an Stelle desselben ein Wasserzersetzungsapparat *W* mit verdünnter Schwefelsäure vom specif. Gewicht 1,14, in welche zwei $^1/_{10}$ mm dicke, 25 mm lange, bis auf ihre Enden in Glasröhren eingeschmolzene ⊾förmige Platindrähte als Elektroden tauchten. Die Zersetzungsgase wurden in Glasröhren von 11 mm Weite aufgefangen. Die Polarisation der Elektroden durch die Zersetzungsgase beträgt hierbei nach Bd. II, §. 758 etwa das 1,95fache der elektromotorischen Kraft eines Grove'schen Elementes. Die Spirale *M* war 130 mm lang, im Innern 20 mm weit und enthielt 500 Windungen von 2 mm dickem Kupferdraht. An der Verbindungsstelle *d* der Drähte wurde ein Commutator (Analysator) von einer ähnlichen Construction wie der Bd. I, §. 323, abgebildete eingefügt, durch welchen die einzelnen Zweige abwechselnd in beliebiger Weise schnell hinter einander verbunden werden konnten, so

Fig. 18.

dass durch *cGd* entweder nur die in der Spirale *M* bei der Schliessung oder nur die bei der Oeffnung der Verbindung mit der Säule inducirten Extraströme fliessen konnten.

Bei constanter Schliessung der Säule (2 Bunsen'scher Elemente) wird bald die Polarisation im Wasserzersetzungsapparat so gross, dass sie den im Zweige *cGd* circulirenden Theil des Stromes der Säule aufhebt und das Galvanometer *G* keine Ablenkung zeigt. Wird aber der Commutator gedreht, so addiren sich in dem einen Falle in *cGd* die Schliessungsextraströme zu den durch die Polarisation erzeugten Strömen und bewirken eine Ablenkung der Galvanometernadel; im anderen Fall überwiegt die elektromotorische Kraft der Oeffnungsextraströme so sehr über die der Polarisation, dass gleichfalls eine Ablenkung eintritt. Wird an Stelle der Spirale *M* ein Neusilberdraht von gleichem Widerstand eingeschaltet, so wird bei Drehung des Commutators die Galvanometernadel nicht abgelenkt; der Polarisationsstrom selbst ist also verschwindend gegen die Extraströme.

Die in dem Wasserzersetzungsapparat selbst erscheinende Elektrolyse ist demnach der Wirkung der letzteren zuzuschreiben. Ist bei der Induction bei Unterbrechung der Verbindung mit der Säule die elektromotorische Kraft der in M inducirten Oeffnungsextraströme gleich e, ist die elektromotorische Kraft der Polarisation in den Wasserzersetzungsapparat W gleich p, ist der Widerstand des Kreises $MbcGWd$ gleich r, so ist die während der Zeit t des Verlaufes des Extrastromes zersetzte Wassermenge w proportional $(e-p)t/r$. Nimmt man an, dass p während des Verlaufes des Extrastromes constant bleibt (was nicht ganz richtig ist), so kann man aus den bei verschiedenen Stromintensitäten I des inducirenden Stromes zersetzten Wassermengen den Werth $p.t$ eliminiren. Dann zeigt sich, dass die zersetzte Wassermenge w der obigen Formel entspricht, wenn man $e = const\, I$ setzt.

So fand sich u. A. bei 400 Umdrehungen des Commutators

I	0,656	0,470	0,367	0,279	0,178
w gef.	11,10	7,36	5,45	3,31	1,33
w ber.	11,10	7,34	5,24	3,46	1,40

Bei der Berechnung ist $const = 20{,}30$, $pt = 2{,}21$ gesetzt. Die elektromotorische Kraft des Oeffnungsinductionsstromes ist also der Intensität des inducirenden Stromes proportional.

Bei der Schliessungsinduction fliesst durch den Zweig cGd nur ein kleinerer Theil des Inductionsstromes, indem ein grosser Theil desselben durch den Zweig $ckzd$ verläuft; die Wasserzersetzung ist demnach viel schwächer. — Beobachtet man in dem Zweig cGd ausser dem Wasserzersetzungsapparat noch den Ausschlag des Galvanometers, so zeigt sich bei Anwendung von Säulen von verschiedener elektromotorischer Kraft an Stelle der Kette kz die Ablenkung der Nadel des Galvanometers G durch die beim Oeffnen des Stromkreises durch den Commutator inducirten Ströme gleich gross, wenn durch Einschaltung von Widerständen die Intensität des Stromes im Zweige $ckzd$ constant erhalten wird.

Die elektromotorische Kraft des Oeffnungsinductionsstromes ist also von der elektromotorischen Kraft des inducirenden Stromes bei gleicher Intensität desselben unabhängig.

Bei den Schliessungsströmen nahm hierbei mit wachsender elektromotorischer Kraft der den inducirenden Strom liefernden Kette der Ausschlag der Galvanometernadel zu, weil dann der Widerstand des Zweiges $ckzd$ grösser war und sich so ein kleinerer Theil des Extrastromes in denselben verzweigte [1]).

[1]) In Betreff der übrigen in ähnlicher Weise erhaltenen Resultate, nach denen die Zeitdauer der Schliessungsinduction mit wachsender Stromstärke des inducirenden Stromes wächst und gleich starke Ströme von verschieden starken Elektromotoren um so grössere elektromotorische Kräfte beim Schliessen induciren, je grösser ihre elektromotorische Kraft ist, verweisen wir auf die Originalabhandlung. Da man die Aenderungen der Polarisation während des Verlaufes der Inductionsströme nicht kennt, werden die Versuchsbedingungen complicirt.

IV. Inducirte Ströme höherer Ordnung.

56 Wie ein dauernder galvanischer Strom bei Aenderungen seiner Intensität Inductionsströme erzeugen kann, so vermag auch wiederum ein Inductionsstrom bei seinem Entstehen und Vergehen in benachbarten Leitern neue Inductionsströme hervorzurufen.

Legt man eine Reihe von Bandspiralen in der Fig. 19 gezeichneten Ordnung auf und neben einander, so kann man beobachten, dass beim Schliessen oder Oeffnen des die Spirale I durchfliessenden Stromes nicht

Fig. 19.

II IV I III

nur der mit den Enden der Spirale II verbundene menschliche Körper eine Erschütterung erhält, sondern dass auch, wenn man die Enden der Spirale II mit denen der Spirale III verbindet, in der über letztere gelegten Spirale IV ein Inductionsstrom erregt wird, welcher physiologische Wirkungen hervorbringen kann. Wird die Spirale IV noch weiter mit einer Spirale V verbunden, so zeigen die physiologischen Wirkungen auch noch einen inducirten Strom in einer auf sie gelegten Spirale VI an u. s. f.

Wir bezeichnen hierbei den durch den ursprünglichen Strom inducirten Inductionsstrom als Inductionsstrom erster Ordnung, den durch letzteren inducirten Strom als Inductionsstrom zweiter Ordnung u. s. f. Andere Physiker bezeichnen den ursprünglichen Strom als primären, die Inductionsströme der Reihe nach als secundären, tertiären Strom u. s. f.[1]).

57 Jeder dieser Ströme besteht aus zwei auf einander folgenden Theilen, aus dem beim Entstehen und dem beim Vergehen des vorhergehenden Stromes niederer Ordnung inducirten Strom, von dem der erste diesem Strome entgegengerichtet, der andere ihm gleichgerichtet ist.

Man kann sich von der Richtigkeit dieses von Henry zuerst aufgestellten Satzes auf verschiedene Weise überzeugen.

Man unterbricht durch ein Zahnrad den Schliessungskreis eines eine inducirende Spirale durchlaufenden Stromes. Hierdurch werden abwech-

[1]) Henry, Pogg. Ann. Ergänzungsbd. 1, p. 296, 1842*.

selnd gerichtete Schliessungs- und Oeffnungsinductionsströme in einer, die erste Spirale umgebenden Inductionsspirale erzeugt. Von diesen Inductionsströmen leitet man vermittelst des §. 4 beschriebenen Disjunctors nur die einen oder nur die anderen durch eine dritte Spirale. Legt man auf die dritte Spirale eine mit dem Galvanometer verbundene vierte Spirale, so entstehen in derselben Inductionsströme zweiter Ordnung. Diese lenken wegen ihrer abwechselnden Richtung die Nadel des Galvanometers, wenn sie auf Null steht, kaum ab[1]). Steht aber die Nadel des Galvanometers nicht genau parallel den Windungen des Multiplicators desselben, so schlägt sie nach Abria[2]) in der Richtung ihres ersten Ausschlages weiter aus, welches auch der Sinn desselben sei. Dieses Phänomen der doppelsinnigen Ablenkung ist ein deutlicher Beweis von der abwechselnden Richtung der durch das Galvanometer fliessenden Ströme.

58 Am besten kann man die beiden entgegengesetzt gerichteten Theile, zunächst eines Inductionsstromes zweiter Ordnung, nachweisen, indem man in seinen Schliessungskreis eine Geissler'sche Spectralröhre einschaltet. Bei der Induction erscheint an beiden Elektroden derselben blaues Glimmlicht, was anzeigt, dass durch beide der negative Strom in die Röhre eintritt. Lässt man vor der Röhre um eine ihrer Längsrichtung parallele Axe einen Spiegel sehr schnell rotiren, so beobachtet man darin bei jeder Schliessung und Oeffnung des primären Stromes je zwei Bilder der Röhre, bei denen die entgegengesetzten Elektroden mit Glimmlicht bedeckt sind und welche den beiden entgegengesetzt gerichteten Theilen des Inductionsstromes entsprechen.

Bringt man eine in den Schliessungskreis eines Stromes zweiter Ordnung eingefügte Entladungsröhre mit weiterem mittleren Theil zwischen zwei ungleichnamige Magnetpole, so theilt sich die Entladung in zwei nach beiden Seiten der Aequatorialebene abgelenkte Lichtstreifen, was wiederum die doppelte Richtung der Entladung anzeigt.

In gleicher Weise kann man die Ströme höherer Ordnung zerlegen.

59 Leitet man die Ströme höherer Ordnung durch ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Voltameter, so erhält man, wie zu erwarten, nach Verdet[3]) an beiden Platinelektroden beide Gase, Sauerstoff und Wasserstoff, und zugleich beobachtet man die Disagregation des Platins (Bd. II, §. 638). Die Quantität der Gase und ihr Verhältniss zu einander ist indess durch die secundären Einflüsse, z. B. Wiedervereinigung der an derselben Elektrode entwickelten Gase u. s. f., bei verschiedenen Versuchen sehr unbeständig.

---

[1]) Henry, Pogg. Ann. 54, p. 94, 1841*. — [2]) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 7, p. 486, 1843*. — [3]) Verdet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 29, p. 501, 1850*.

Beim Einlegen von Eisencylindern ist die elektrolytische Wirkung dieser Ströme weit bedeutender.

Dieselben Erscheinungen kann man vermittelst eines Ruhmkorff'schen Inductoriums (siehe weiter unten) erhalten. Verbindet man zunächst die Inductionsspirale desselben mit den Elektroden eines Voltameters, so erscheinen beim Oeffnen und Schliessen des inducirenden Stromes an denselben abwechselnd beide Gase. Unterbricht man aber den Schliessungskreis des inducirten Stromes an einer Stelle, so vermag nur der beim Oeffnen inducirte Strom, in welchem die gleiche Elektricitätsmenge, wie im Schliessungsstrom, aber in kürzerer Zeit, also in grösserer Dichtigkeit inducirt ist, daselbst die Luft in einem Funken zu durchbrechen (siehe weiter unten), und die Zersetzung geschieht polar. Die an den Elektroden abgeschiedenen Gase zeigen, dass der hindurchgegangene Oeffnungsinductionsstrom die gleiche Richtung wie der inducirende Strom hat. — Leitet man so den Inductionsstrom des Ruhmkorff'schen Apparates, ohne eine Unterbrechung anzubringen, durch die eine Drahtlage *A* einer mit zwei Drähten umwundenen Spirale, so bildet sich in der zweiten Drahtlage *B* derselben der doppelt gerichtete tertiäre Strom, der beim Hindurchleiten durch ein Voltameter an jeder Elektrode beide Gase abscheidet. Wird indess sein Schliessungskreis unterbrochen, so dass nur der eine kürzere Zeit dauernde, dichtere Theil dieses Stromes durch einen Funken an der Unterbrechungsstelle sich ausgleichen kann, so wird die Zersetzung wiederum polar und zeigt an, dass jener Theil des Stromes dem secundären entgegengerichtet ist.

Aehnliche Resultate hat Masson[1]) erhalten, indem er durch den Inductionsstrom des Ruhmkorff'schen Apparates einen Condensator von 9 bis 26 qdcm Oberfläche lud und durch eine auf eine Glasplatte geklebte flache Drahtspirale entlud. Der letzteren war eine eben solche Spirale gegenübergestellt, in welcher bei jeder Entladung des Condensators ein doppelt gerichteter Inductionsstrom inducirt wurde, welcher das Phänomen der doppelsinnigen Ablenkung der Galvanometernadel, die gleichzeitige Abscheidung der beiden Gase an den Elektroden des Voltameters u. s. f. zeigte, von dem bei Unterbrechung seiner Schliessung durch ein Funkenmikrometer aber nur der dem inducirenden Strom gleichgerichtete Strom zwischen den Kugeln desselben übergingen. Die Ströme dritter und vierter Ordnung sind ebenfalls doppelsinnig, indess sind die durch das Funkenmikrometer hindurchgehenden Theile derselben stets der Richtung des nächst niederen Stromes entgegengesetzt.

60 Leitet man die Ströme in der primären inducirenden Spirale, sowie die tertiären Ströme, durch einen Disjunctor zum Galvanometer, so dass in demselben nur die beim Oeffnen der primären Spirale inducirten Ströme circuliren können, während die die secundären Ströme leitende Spirale

---

[1]) Masson, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 52, p. 418, 1858*.

in sich geschlossen ist, so zeigt der einseitige Ausschlag der Nadel nur eine dem inducirendem Strome entgegen gerichtete, negative Reihe von Inductionsströmen an, da wohl der Uebergang der positiven Inductionsströme grossentheils wegen ihrer geringeren Dichtigkeit an den Federn des Disjunctors gehemmt wird. Fängt man nur die beim Schliessen der primären Spirale inducirten tertiären Ströme auf, so zeigt das Galvanometer eine überwiegende Wirkung der positiven Inductionsströme an [1]).

61 Man hat auch versucht, die Richtung der inducirten Ströme höherer Ordnung in der Weise zu bestimmen, dass man sie durch einen sogenannten Indicator leitete. Derselbe besteht aus einer Drahtspirale, in welche man Stahlnadeln einlegt. Die Richtung der Magnetisirung der letzteren durch die durch die Spirale geleiteten Inductionsströme, welche man durch Annähern der Nadel an die Pole einer Magnetnadel bestimmen kann, sollte die Richtung der magnetisirenden Inductionsströme angeben.

Wird die Richtung des inducirenden Stromes mit + bezeichnet, so ergab sich in dieser Weise die scheinbare Richtung der Ströme höherer Ordnung wie folgt:

	beim Oeffnen des primären Stromes	beim Schliessen des primären Stromes
Die Richtung des inducirenden Stromes . . .	+	+
Inducirter Strom erster Ordnung	+	—
„ „ zweiter Ordnung	—	+
„ „ dritter Ordnung	+	—
„ „ vierter Ordnung	—	+
„ „ fünfter Ordnung	+	—

Hiernach wechselt also scheinbar die Richtung der Inductionsströme höherer Ordnung [2]).

Nach Abria [3]) würde, wenn man eine Reihe von Spiralen nach einander zur Erzeugung von Strömen höherer Ordnung benutzt und das Verhältniss der Inductionsströme zweier auf einander folgender Ordnungen durch Magnetisirung von Stahlnadeln vergleicht, dasselbe nahezu constant bleiben zwischen den Strömen zweiter und erster oder dritter und zweiter Ordnung.

[1]) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 7, p. 487, 1843*. — [2]) Henry, l. c. — [3]) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 3, p. 59, 1841*.

Diese Versuche geben indess keine sicheren Resultate. Wenn jeder Inductionsstrom höherer Ordnung aus zwei ganz gleichen und gleich verlaufenden, einander entgegengesetzten, beim Entstehen und Vergehen des nächst niederen Stromes inducirten Stromes bestände, so würde eine Stahlnadel, welche der Wirkung beider Partialströme nach einander ausgesetzt wäre, im Sinne des zuletzt wirkenden Stromes magnetisirt erscheinen, da zum Umkehren ihres, durch den ersten Partialstrom erzeugten Magnetismus ein schwächerer Gegenstrom erforderlich ist, als zum Magnetisiren (vergl. Bd. III, §. 496). — Ausserdem kann aber bei gleicher Gesammtintensität die Zeitdauer der beiden Inductionsströme, aus denen die Ströme höherer Ordnung bestehen, sehr verschieden sein, indem der nächst niedere Strom mit einer anderen Geschwindigkeit entstehen kann, als die ist, mit der er verschwindet. Dann ist schon von vornherein die magnetische Wirkung der Partialströme verschieden, indem der Strom, welcher bei gleicher Gesammtintensität kürzere Zeit dauert, also in einer gegebenen Zeit eine grössere Intensität besitzt, die Stahlnadeln stärker magnetisirt.

Hiernach liefern die Versuche über die Magnetisirung von Stahlnadeln durch die Inductionsströme höherer Ordnung durchaus keinen Anhaltspunkt für die Bestimmung ihrer Richtung.

V. Induction bei Umkehrung der elektrodynamischen und elektromagnetischen Rotationen. Unipolare Induction.

62 Neben den bisher betrachteten, einfacheren Erscheinungen der Induction in linearen Leitern lassen sich noch manche andere aufführen. Nach dem Lenz'schen Gesetze erhalten wir inducirte Ströme in einem Schliessungskreise in allen Fällen, in denen durch einen galvanischen Strom in demselben eine Bewegung eines zweiten Leiters oder eines Magnetes hervorgebracht wird, wenn wir umgekehrt den zweiten Leiter oder den Magnet bewegen und im letzteren Falle den Schliessungskreis, welcher vorher die Säule enthielt, in sich schliessen.

Wir können daher namentlich die in Bd. III, §. 155 und folgende erwähnten elektrodynamischen und elektromagnetischen Rotationsapparate auch zur Erzeugung von Inductionsströmen verwenden.

63 Ein der Umkehrung der elektrodynamischen Rotation entsprechender Inductionsversuch, bei welchem noch besondere Eigenthümlichkeiten zu beachten sind, ist der folgende:

F. E. Neumann[1]) hat mit dem einen Pol *a* der Säule einen ringförmi-

[1]) F. E. Neumann, Abhandl. der Berl. Akad. 1847, p. 59*.

gen Draht *bcd*, Fig. 20, verbunden, dessen Enden *b* und *d* sehr nahe einander gegenüber standen. In der Mitte des Drahtringes war eine Metallaxe *ef* aufgestellt, von der ein Draht *ec* ausging, welcher auf dem Kreise *bcd* schleifte. Das andere Ende *f* der Axe war mit dem anderen Pole der Säule verbunden. Concentrisch zu dem Ringe *bcd* war ein zweiter

Fig. 20.

Drahtkreis *klm*, der Inductionskreis, befestigt. Das eine Ende desselben *l* war mit dem einen Ende des Drahtes des Galvanometers *g*, das andere mit einer Feder *n* verbunden, die auf einem isolirt auf die Axe *ef* aufgesetzten Blechring *r* schleifte. Eine zweite gegen denselben schleifende Feder *o* führte zum zweiten Ende *h* des Galvanometerdrahtes. Ein mit Holz ausgelegter Ausschnitt des Blechringes *r* vermittelte, dass jedesmal, wenn der Leiter *ec* bei der Drehung der Axe *ef* von dem Ende *d* auf das Ende *b* des Ringes *bcd* übertrat, der Inductionskreis *lkmnrohg* geöffnet war, so dass die beim Oeffnen und Schliessen des inducirenden Kreises inducirten Ströme nicht in den Multiplicator gelangten. — Bei der Drehung der Axe *ef* vermittelst eines Schwungrades und eines Schnurlaufes *s* erhält man einen inducirten Strom.

Wird dagegen die Schliessung des Inductionskreises nicht unterbrochen, während das bewegliche Leiterstück *ec* von *d* auf *b* übertritt, so erhält man bei schneller Drehung keinen Strom, indem die beim Oeffnen und Schliessen des inducirenden Kreises bei jenem Uebergange des Leiterstückes von *d* nach *b* inducirten Ströme sich mit dem durch die Bewegung des Leiterstückes *ec* inducirten gerade aufheben.

64 Einen ganz ähnlichen Versuch hat W. Weber[1]) angestellt, indem er einen Messingreifen von 120 mm Durchmesser mit 1 kg übersponnenem Kupferdraht von 0,66 mm Dicke umwickelte, dessen Enden mit dem Multiplicator verbunden waren. Eine Axe, welche in der Mitte des Messing-

[1]) W. Weber, Elektrodyn. Maassbest. 2, p. 315*.

reifens aufgestellt war, trug einen Kupferring, von dem drei Messingfedern ausgingen, die auf der inneren Fläche des Messingreifens schleiften. Wurde die Axe und der Messingreifen mit den Polen einer Säule verbunden und die Axe mit den Messingfedern gedreht, so erhielt man in dem Drahtgewinde keinen Inductionsstrom.

Dieser Versuch entspricht also nicht einer einfachen Umkehrung der Rotationserscheinungen, denn die Axe mit den Federn würde rotiren, wenn man durch sie und den Messingreifen und ausserdem durch das den letzteren umgebende Drahtgewinde einen Strom leitete.

Die von Neumann beobachtete Erscheinung beruht darauf, dass bei jeder ganzen Umdrehung des rotirenden Leiterstückes der inducirende Kreis mit seiner ganzen Länge in die Schliessung eintritt, wie wenn ein vom Strom durchflossener Drahtkreis von gleichen Dimensionen plötzlich an seine Stelle gebracht worden wäre. Hierdurch entsteht in dem umgebenden Drahtring eine inducirte elektromotorische Kraft. Gleitet sodann das rotirende Leiterstück bei der Unterbrechungsstelle von dem Drahtkreise ab, so tritt derselbe aus der Leitung hinaus, und eine gleich starke, aber entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft wird in dem umgebenden Inductionskreise inducirt, wie vorher. Beide Inductionen würden sich aufheben, wenn der inducirte Kreis nicht während des Abgleitens des rotirenden Radius von dem inducirenden Kreise geöffnet würde und so die entgegengesetzte Induction keinen Strom zur Folge haben könnte.

Bei dem Versuche von Weber theilt sich dagegen der durch die Feder an der Axe in den Ring eintretende Strom an jeder Eintrittsstelle, indem er von derselben nach beiden Seiten zur Verbindungsstelle des kreisförmigen Stückes mit dem zweiten Pole der Säule hinfliesst. In diesem Falle ändert sich bei der Drehung der Feder in den Elementen des Ringes, über welche dieselbe gerade hinweggleitet, die Richtung des Stromes, und zugleich ändert sich die Intensität desselben in den ganzen beiden Hälften der Leitung von der Feder bis zur Ableitungsstelle des Ringes zur Säule. Die durch beide Aenderungen bewirkten Inductionswirkungen auf die den Ring umgebende Spirale heben sich aber auf. — Wir werden auf diese Versuche noch in dem Schlusscapitel bei der Betrachtung der Theorie der Induction von Weber zurückkommen.

Dass in der That die Inductionswirkung in dem ersten Versuche so stattfindet, wie wir beschrieben, zeigen einige quantitative Versuche von W. Weber.

Der Arm ec des Apparates, Fig. 20, wurde auf den Punkt d des inducirenden Leiters gestellt und der inducirende Strom plötzlich geschlossen. Der Spiegel des die Intensität des inducirten Stromes messenden Spiegelgalvanometers zeigte eine Ablenkung von 8 Scalentheilen.

Wurde aber der Arm ec 10 mal in der Secunde herumgedreht und der inducirte Stromkreis jedesmal beim Uebertreten von ec von d auf b geöffnet, so ergab sich eine Ablenkung von 377 Scalentheilen. Der

Spiegel des Galvanometers brauchte 10 Secunden zu einer Schwingung, erhielt also während derselben 100 Inductionsstösse. Durch die Formeln, Bd. III, §. 335, kann man die jedem einzelnen Inductionsstoss zukommende Ablenkung des Spiegels berechnen. Sie ergiebt sich gleich 8,16, also nahezu wie oben. Jedenfalls ist also die ganze Induction nur durch das Ansteigen des Stromes in dem ruhenden Drahtkreise bei der Drehung des Armes *ec* bedingt.

65 Bei der Umkehrung der Rotationen eines oder mehrerer Magnete unter Einfluss eines Stromes erhält man Inductionsströme, wenn man die den Strom erregende Säule durch einen beliebigen Leiter ersetzt und die Magnete mechanisch bewegt. Bei dieser Induction zeigen sich keine solchen Anomalieen, wie bei den soeben erwähnten Inductionen, indem hier die Molecularströme des inducirenden Magnetes unverändert bleiben und nicht neue Theile der Leitung in die Schliessung eintreten. Sie sind daher einfach als Umkehrungen der entsprechenden elektromagnetischen Rotationen anzusehen. Wie dort muss auch hier der Pol durch den geschlossenen Stromkreis hindurchgehen.

Löthet man auf eine Metallaxe *a*, Fig. 21, eine Kupferscheibe *b* und an diese einen der Axe conaxialen, auf der einen Seite offenen Cy-

Fig. 21.

linder *c* von Kupferblech, und lässt gegen den Cylinder und einen Punkt der Axe zwei Federn *d* und *e* schleifen, welche mit dem Galvanometer *G* verbunden sind, so zeigt dasselbe einen Ausschlag, wenn man die Axe durch einen Schnurlauf in Rotation versetzt und zugleich den einen Pol *s* eines Magnetes *ns* in den Kupfercylinder einsenkt. — Der hierbei inducirte Strom ist gerade entgegengesetzt gerichtet dem Strome, welchen man vermittelst der Federn *d* und *e* durch den Kupfercylinder *c* leiten müsste, um ihn unter Einfluss des Magnetes *ns* in eine elektromagnetische Rotation zu versetzen, welche der ihm mechanisch mitgetheilten Rotation gleich wäre.

In diesem Falle ist die Induction durch die Bewegung des Kupfercylinders an dem Magnet vorbei bedingt. Die inductorische Wirkung entspricht der elektromagnetischen Wirkung zwischen ihnen ohne weitere Nebenumstände.

66 Wir befestigen ferner einen, zwei oder mehrere Magnete ns, Fig. 22, parallel neben einander in einer Kupferplatte a, welche auf eine den Magneten parallele Axe xx aufgesteckt ist. Auf die Axe setzen wir

Fig. 22.

zwei kleinere Metallräder b und c, gegen welche die Federn d und e schleifen, die mit den Klemmschrauben f und g verbunden sind. Lassen wir in gleicher Weise gegen a die mit der Klemme h verbundene Feder i schleifen und verbinden f und h oder g und h mit den Polen einer Säule, so rotirt die Platte a mit den Magneten. Verbinden wir umgekehrt die Klemmen f und h oder g und h mit dem Galvanometer und versetzen mittelst eines um die Rolle k gelegten Schnurlaufes die Magnete in Rotation, so entsteht in der Schliessung des Galvanometers ein Inductionsstrom, der entgegengesetzt ist dem Strom, welcher beim Hindurchleiten durch die betreffenden Federn die Magnete in jene Rotation versetzt hätte. Verbinden wir dagegen die Federn g und f mit dem Galvanometer, so erhalten wir ebenso wenig bei der Drehung der Scheibe a einen Inductionsstrom, wie eine Rotation derselben beim Verbinden der Federn g und f mit den Polen einer Säule eintritt.

67 Zwischen den Magneten und den mit ihnen fest verbundenen Theilen des Schliessungskreises des inducirten Stromes kann hier weder eine elektromagnetische, noch auch eine Inductionswirkung ausgeübt werden. Dieselbe beschränkt sich auf die Wechselwirkung zwischen den Magneten einerseits und den Federn d und i oder e und i und den zwischen ihnen eingeschalteten Theilen der Schliessung andererseits.

Wie sich bei der Rotation der Magnete durch einen Strom dieselben durch Solenoide ersetzen lassen, so kann dies auch bei den Inductionswirkungen geschehen, so dass sich die Induction zwischen Magneten und

Leitern auf die Induction zwischen in sich geschlossenen kleinen Strömen und den Leitern genau ebenso zurückführen lässt, wie wir die elektromagnetischen Rotationserscheinungen auf elektrodynamische Erscheinungen reducirt haben.

68 Denkt man sich die Enden eines geradlinigen Leiters *AB* durch einen Kreisbogen *ACB* verbunden, an welchem ein Magnet befestigt ist, dessen Pole zu *AB* nicht symmetrisch liegen, und dreht man *ACB*, so kann wiederum in *ACB* kein Strom inducirt werden, da der Magnet bei der Rotation gegen *AB* dieselbe relative Lage behält und der Leiter keine seitliche Polarität hat (s. w. u.). Ebenso wenig kann durch Drehung von *AB* um seine eigene Axe bei feststehendem Magnet ein Strom inducirt werden, wohl aber würde beim Herumführen von *AB* um den Magnet ein Strom inducirt, da er dann seine relative Lage gegen den Pol ändert, ebenso wie in *AB* ein Strom inducirt wird, wenn sich der Magnet um seine Axe dreht[1]).

69 Einen besonderen Fall der im vorigen Paragraphen behandelten Inductionserscheinungen liefert die unipolare [nach Matteucci[2]) axiale] Induction durch die Rotation eines Magnetes um seine eigene Axe, welche zuerst von Faraday[3]) beobachtet worden ist.

Fig. 23.

Man befestigt an den Enden eines cylindrischen, stabförmigen Stahlmagnetes *m*, Fig. 23, metallene Fassungen, mittelst deren der Magnetstab zwischen zwei stählerne Spitzen *a* und *b* eingesetzt werden kann[4]). Auf das eine Ende des Magnetes wird ein Zahnrad oder eine Rolle geschoben, und derselbe durch andere Zahnräder, welche in das erste eingreifen, oder einen Schnurlauf in schnelle Rotation versetzt. Auf den

---

1) Margules, Wien. Ber. 77, Mai 1878*; Wied. Ann. 6, p. 59, 1879*. — 2) Matteucci, Cours spécial sur l'induction, p. 65, Paris 1854*. — 3) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 217 bis 230, 1832*, auch Ser. 28, 1851*. — 4) W. Weber, Resultate d. magn. Vereins 1839, p. 63*; Pogg. Ann. 52, p. 353*.

Magnet schiebt man ein kupfernes Rädchen *s* auf, welches in einen untergestellten Quecksilbernapf *g* eintaucht. Verbindet man eine der Stahlspitzen *a* oder *b* und das Quecksilbernäpfchen *g* mit den Enden des Drahtes eines Galvanometers, so erhält man darin einen Strom. Die Richtung desselben hängt von der Polarität des Endes des Magnetes ab, welches mit dem Galvanometer verbunden ist, und zugleich von der Richtung der Rotation des Magnetes.

Ist z. B., wie in Fig. 24, dieser Pol der Nordpol *N* des Magnetes, und rotirt der Magnet so, dass die gegen den Beschauer gekehrte Seite in der Richtung des Pfeiles, also von oben nach unten sich dreht, so fliesst der Strom durch den Magnet vom Ende zur Mitte und durch die Schliessung *abc* weiter in der Richtung des Pfeiles *p*.

Fig. 24.

Leitet man durch den Draht *abc* in der Richtung des Pfeiles *p* einen Strom, so rotirt der Magnet gerade in entgegengesetzter Richtung um seine Axe, wie er zur Erzeugung des Inductionsstromes gedreht werden muss, dessen Richtung durch den Pfeil angegeben ist.

70 Auch hier kann zwischen dem Magnet und den mit ihm fest verbundenen Theilen der Leitung keine elektromagnetische, und ebenso auch keine Inductionswirkung auftreten, sondern nur dadurch, dass jeder Punkt in ihm, sowie jeder Punkt der Peripherie seiner Molecularströme bei der Rotation seine relative Lage gegen den ruhenden Leitungsdraht ändert, welcher zwei seiner Punkte verbindet.

Aus der unmittelbaren Anwendung des Biot-Savart'schen Gesetzes (Bd. III, §. 123) könnte man freilich die Folgerung ziehen, dass ein mit einem Magnet fest verbundenes Leiterelement, durch welches ein Strom fliesst, mit ihm in eine derartige Wechselwirkung träte, dass beide durch ein Kräftepaar um eine mittlere Drehungsaxe zu rotiren strebten. Dann würde auch umgekehrt bei der Rotation eines Magnetes um seine Axe in allen seinen Fasern durch die Wirkung der benachbarten Fasern eine elektromotorische Kraft inducirt werden können, vermöge deren sich der Magnet, je nach der Rotationsrichtung, in der Mitte mit der einen, an den Enden mit der entgegengesetzten freien Elektricität laden würde [1]). — Wir haben aber schon Bd. III, §. 151 angeführt, dass wir annehmen, die elektromagnetischen Rotationen finden nur statt, wenn dabei die einzelnen Punkte des Magnetes und Leiters ihre relativen Lagen gegen einander ändern. Dann kann eine solche Ansammlung freier Elektricitäten auf dem Magnet nicht eintreten [2]). Wir kommen im Schlusscapitel auf diese Punkte zurück.

---

[1]) Nobili, Pogg. Ann. **27**, p. 421, 1833*. Plücker, Pogg. Ann. **87**, p. 352, 1852*. — [2]) Beer, Pogg. Ann. **94**, p. 177, 1855*.

Wenn aber der Magnet nur auf die Leiter, welche nicht an seiner Rotation theilnehmen, eine Inductionswirkung ausübt, so ist es, analog wie bei den elektromagnetischen Rotationen, völlig gleichgültig, ob der Magnet selbst als Leiter der inducirten Ströme dient oder ob dieselben durch einen mit ihm fest verbundenen Draht hindurchgehen, wie z. B. wenn man auf seine Mitte und sein Ende isolirt zwei mittelst eines Drahtes verbundene Metallscheiben aufsetzt, welche durch Federn oder Quecksilbernäpfe mit den Leitungsdrähten des Galvanometers verbunden sind, und mit dem Drahte den Magnet in Rotation versetzt. Die Induction tritt hier ebenso ein, wie wenn der Magnet selbst als Leiter dient.

71 Ein Apparat von Fessel[1]) gestattet, diese verschiedenen Verhältnisse recht anschaulich zu machen. Er ist im Wesentlichen folgendermaassen construirt: Durch ein Schwungrad *O*, Fig. 25, mit Treibschnüren

Fig. 25.

werden zwei auf einer Axe sitzende Räder *a* und *b* gedreht. In das eine *a* ist ein cylindrischer Stahlmagnet *ns* eingesetzt. Das andere Rad *b* umfasst den Stahlmagnet und trägt einen ihm conaxialen Kupfercylinder *c*. Durch eine Schraube *d* kann man den Stahlmagnet feststellen, so dass das ihn treibende Rad *a* gehindert wird, sich zu drehen. Ebenso kann man durch Schraube *e* den Kupfercylinder *c* anhalten.

Lüftet man beide Schrauben *d* und *e*, so drehen sich Magnet und Kupfercylinder gemeinschaftlich. — Auf den letzteren sind Metallscheiben gesetzt, die in Quecksilbernäpfe eintauchen, oder es schleifen, wie in der Figur, gegen denselben Federn *f*, *g*, *h*, welche man mit dem Galvanometer verbinden kann. Auch kann das eine oder andere Ende des Magnetes durch die Axe *i* der Räder *a* und *b* oder durch Schraube *d* mit einem Galvanometer verbunden werden, sowie durch eine in dem Kupfer-

[1]) Vergl. Plücker, l. c., p. 361*.

cylinder angebrachte Oeffnung *k* eine Metallfeder gegen den Magnet gedrückt werden, welche die Verbindung seiner Mitte mit dem Galvanometer vermittelt. — Verbindet man erstens die Federn *g* und *h* mit dem Galvanometer und dreht den Magnet *ns* allein, so erhält man keinen Inductionsstrom, da der Kupfercylinder zwischen *g* und *h* und das Galvanometer einen geschlossenen Kreis bilden und sich die Inductionswirkungen in demselben ebenso aufheben, wie z. B. beim Durchleiten eines Stromes durch diesen Kreis der Magnet *ns* nicht in Rotation geräth. — Lässt man zweitens hierbei den Magnet mit dem Kupfercylinder zusammen rotiren, so erhält man einen gleich starken und im Galvanometer gleichgerichteten Strom, wie wenn der Magnet festgehalten und nur der Kupfercylinder allein in Rotation versetzt wird. — Im ersteren Falle wird die Induction in dem zwischen *g* und *h* eingeschalteten Leiterstück, im zweiten in dem zwischen *g* und *h* liegenden Stück des Kupfercylinders hervorgerufen, indem der Magnet in beiden Fällen nur gegen diese Stücke seine relative Lage ändert. Beide Inductionen sind gleich und in den der Induction unterworfenen Leiterstücken einander entgegengesetzt. Auch hier ist die Analogie mit den elektromagnetischen Rotationen ersichtlich, da es bei diesen ebenso nur auf die Lage der Endpunkte des vom Strom durchflossenen ruhenden und mit dem Magnet rotirenden Leiters ankommt. — Wird der Magnet selbst durch die Feder *k* und eine der Schrauben *d* oder *i* mit dem Galvanometer verbunden und für sich in Rotation versetzt, so fällt der Versuch mit dem §. 69 beschriebenen zusammen. — Wird der Magnet mit dem Kupfercylinder durch einen in der Mitte und an den Enden eingesenkten Metallstift leitend verbunden und werden beide zugleich in Rotation versetzt, so ist der im Leiterstück zwischen der Feder *g* und der Schraube *d* oder *i* inducirte Strom intensiver, da er jetzt die doppelte Bahn im Magnet und Kupfercylinder hat. — Ersetzt man bei diesen Versuchen das Galvanometer durch eine Säule, so treten die entsprechenden elektromagnetischen Rotationen ein.

72 Zur Erzeugung eines Inductionsstromes bei der unipolaren Induction ist es nicht nöthig, dass die Verbindungen der unveränderlich mit dem rotirenden Magnet verbundenen Leiter mit dem übrigen ruhenden Schliessungskreise einerseits an einer Stelle zwischen den Polen des Magnetes, andererseits an seinem einen Ende geschehen.

Befestigt man auf der Rotationsaxe des Magnetes *ns*, Fig. 26, zwei metallisch mit einander verbundene Kupferscheiben *a* und *b* und lässt die zum Galvanometer führenden Federn *c* und *d* daran schleifen, so erhält man ebenfalls bei der Rotation des Magnetes einen Inductionsstrom. Nur wenn beide Federn gegen die der Magnetaxe entsprechenden Centra der Scheiben gegenliegen, entsteht kein Strom, wie auch ein durch die Elektroden *c* und *d* und die Scheiben *a* und *b* geleiteter Strom den Magnet dann nicht in Rotation versetzen würde.

Auch wenn man nur eine Metallscheibe *a*, Fig. 27, auf die Magnetaxe setzt und an zwei ungleich weit von ihrem Centrum entfernte Punkte die Elektroden *c* und *d* des Galvanometers *G* anlegt, erhält man In-

Fig. 26.

ductionsströme. — In diesem Falle sind dieselben in der Leitung *c G d* inducirt; in der Scheibe *a* selbst entsteht keine Induction, da sie mit dem Magnet unveränderlich verbunden ist. Würde man dagegen die Elek-

Fig. 27.

troden *c* und *d* mit dem Magnet fest verbinden und mit ihm rotiren lassen, während man die Scheibe *a* in Ruhe erhält, so würde bei der Rotation des Magnetes mit den Elektroden die Induction in allen radialen Elementen der Scheibe *a* stattfinden. Schleifen die Elektroden gleichzeitig auf demselben Radius der Scheibe, und betrachten wir nur die Induction in diesem Radius, so ist, wie in §. 71 ersichtlich, dass der hier erzeugte Inductionsstrom dem im vorigen Versuch entstehenden völlig entspricht, ihm aber entgegengerichtet ist.

Lassen wir endlich den Magnet mit den Elektroden *c* und *d* ruhen, und versetzen die Scheibe *a* allein in eine der vorherigen Rotation des Magnetes entgegengesetzte Rotation, so tritt wiederum dieselbe Inductionswirkung ein, da sie nur von der relativen Bewegung des Magnetes, sowie der mit ihm fest verbundenen und der von ihm unabhängigen Theile der Schliessung bedingt ist.

Dieser Versuch lässt sich bequem anstellen, indem man eine Kupferscheibe auf die Axe einer Centrifugalmaschine aufsetzt, in der Verlängerung der Axe vor derselben einen Magnetstab befestigt und auf zwei Stellen der Scheibe amalgamirte Metallfedern drückt, welche an besonderen Haltern befestigt und mit dem Galvanometer verbunden sind.

73 Ein genaueres Studium des letzteren Versuches lässt noch besondere Eigenthümlichkeiten bei den im vorigen Paragraphen erwähnten Fällen der unipolaren Induction erkennen.

Werden die beiden zum Galvanometer führenden Federn in den Abständen R und R_1 von dem Mittelpunkte auf die rotirende Scheibe aufgesetzt und bei unverändertem wechselseitigem Abstand $R - R_1$ nach der Peripherie der Scheibe verschoben, so nimmt allmählich der Strom bis auf Null ab und kehrt sodann seine Richtung um [1]).

Der Grund der Umkehrung erklärt sich wiederum unmittelbar aus der Anwendung des Lenz'schen Gesetzes der Reciprocität der elektromagnetischen und magnetoelektrischen Erscheinungen.

Durchfliesst ein Strom ein kurzes Stück des Radius der Scheibe in einer bestimmten Richtung, so rotirt die Scheibe durch den elektromagnetischen Einfluss des Magnetes auf dasselbe und zwar in verschiedener Richtung, je nachdem sich jenes Stück näher oder ferner von der Axe des Magnetes befindet. Die Lage des Stückes, bei welcher sich die Rotationsrichtung umkehrt, ergiebt sich aus den Berechnungen Bd. III, §. 149. Offenbar wird auch umgekehrt bei der durch äussere Hülfsmittel bewirkten Rotation der Scheibe vor dem Magnetpol in den einzelnen Elementen ihrer Radien ein Strom in der einen oder anderen Richtung inducirt, welcher dem Strom entgegengesetzt ist, der beim Hindurchleiten durch jene Elemente die Scheibe in gleicher Weise in Rotation versetzt, wie die mechanisch auf sie wirkenden Kräfte.

Durch diese Induction wird gegen das Centrum und die Peripherie der Scheibe hin gleichzeitig dieselbe Elektricität getrieben, während in einer zu der Axe des Magnetes concentrischen Zone sich die entgegengesetzte Elektricität anhäuft. Beim Aufsetzen der Drähte des Galvanometers auf diese oder jene Stellen der Radien der Scheibe diesseits oder jenseits jener Zone erhält man daher entgegengesetzt gerichtete Ströme im Galvanometer.

Der Wechsel der Richtung der Inductionsströme muss hier auf denselben Stellen des Radius stattfinden, auf denen die Richtung der oben erwähnten elektromagnetischen Rotation wechselt. — Mit wachsendem Abstande der rotirenden Scheibe vom Magnet verschieben sich jene Stellen immer weiter gegen ihren Rand, wie sich dies aus der Betrachtung der Bd. III, §. 149 und 150 erwähnten Curve der Umkehrung der elektromagnetischen Rotation ergiebt.

---

[1]) Felici, Ann. de Chim. et de Phys. [3] **44**, p. 343, 1855*.

Verbindet man zwei weiter von einander entfernte Punkte des Radius der rotirenden Scheibe mit dem Galvanometer, so erhält man einen Inductionsstrom, welcher durch die Summe der, in allen zwischen ihnen liegenden Elementen inducirten elektromotorischen Kräfte erzeugt ist und verschieden gerichtet sein kann. Verbindet man z. B. das Centrum und die Peripherie der Scheibe mit dem Galvanometer, so ist die Richtung der durch dasselbe gehenden Ströme die gleiche, wie in den dem Centrum der Scheibe zunächst liegenden Elementen, da letztere dem Magnet näher liegen und die in ihnen inducirte elektromotorische Kraft grösser ist, als in den der Peripherie näher liegenden Elementen.

Die analogen Resultate ergeben sich auch bei den anderen §. 72 beschriebenen Versuchsmethoden.

VI. Mathematische Theorie der in linearen Leitern inducirten Ströme.

74 Im Vorhergehenden haben wir die Sätze über die Induction abgeleitet, soweit sie sich aus den Experimenten ergaben.

Für eine genauere Kenntniss sind die Erscheinungen auf allgemeine Gesetze zurückzuführen.

Dies ist zuerst von F. E. Neumann[1]) geschehen, indem er die Stromeswirkungen auf die Wirkung ihrer Elemente zurückführte. Die von ihm entwickelten Sätze ergeben sich auch direct, wie Helmholtz[2]) gezeigt hat, aus dem Princip der Erhaltung der Energie. Wegen ihrer fundamentalen Bedeutung wollen wir die leitenden Gesichtspunkte der Theorie von Neumann hier voranstellen, welche keine besondere Hypothese über die Wirkung der in den Strömen bewegten Elektricitäten selbst involvirt, sondern sich wesentlich nur auf die Erfahrungsresultate stützt.

75 Neumann geht wesentlich von den §§. 26 und folgende angegebenen Resultaten aus, zu denen das Lenz'sche Gesetz hinzukommt. Wird ein vom Strom durchflossener Leiter A in der Nähe eines zweiten Leiters B mit der Geschwindigkeit v bewegt, so wirkt nach diesem Gesetz der in B inducirte Strom auf A so, dass er ihm einen, seiner Bewegung entgegengesetzten Antrieb ertheilt. Wird dieser Antrieb, welchen jedes Element ds des inducirten Leiters B auf jedes Element $d\sigma$ des inducirenden A ausübt, während durch ersteren ein Strom von der Intensität Eins fliesst, nach der Bewegungsrichtung des Elementes $d\sigma$ zerlegt und

1) F. E. Neumann, Abhand. der Berliner Akademie 1845, p. 1* und 1847, p. 1*. — 2) Helmholtz, Die Erhaltung der Kraft, p. 67, Berlin 1847*.

der erhaltene Werth gleich $\gamma . ds . d\sigma$ gesetzt, so ist die einfachste Annahme, dass die in jedem Element ds des Leiters B inducirte elektromotorische Kraft

$$E\,ds = -\,\varepsilon v \gamma\, ds\, d\sigma$$

ist. In diesem Ausdruck ist nach den Versuchen von Lenz, Faraday, Felici u. A. (wenn wir die secundären Erscheinungen bei den magnetischen Metallen ausnehmen) ε eine von dem Stoff und dem Querschnitt des inducirten Leiters unabhängige Constante, die Inductionsconstante, deren Werth mit der von Beginn der Wirkung der inducirenden Kraft an verlaufenden Zeit sehr schnell abnimmt, so dass man wenigstens in linearen Leitern die Induction als momentan betrachten kann. Die elektrodynamische Wirkung γ ist in dem Bd. III, §. 28 erwähnten elektrodynamischen Maass gemessen, nach welchem zwei parallele, auf ihrer Verbindungslinie senkrechte Elemente in der Einheit der Entfernung sich mit der Kraft Eins anziehen, wenn durch beide Ströme von der Intensität Eins fliessen.

76 Bezeichnet Γ die über alle Elemente ds des inducirten Stromkreises ausgedehnte, auf ein Element $d\sigma$ des inducirenden Stromes ausgeübte und nach der Bewegungsrichtung von $d\sigma$ zerlegte elektrodynamische Gegenwirkung, welche statthätte, wenn ein Strom von der Intensität Eins durch den inducirten Stromkreis flösse, so hat der in dem Zeitelement dt in dem ganzen inducirten Kreise erzeugte Strom nach dem Ohm'schen Gesetz die Intensität

$$D = -\,\varepsilon \lambda\, dt\, \Sigma v \Gamma d\sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

wo das Zeichen Σ die Summation über alle Elemente $d\sigma$ des inducirenden Stromkreises andeutet und λ die Leitungsfähigkeit des Schliessungskreises des inducirten Stromes bezeichnet. Eigentlich gilt das Ohm'sche Gesetz nur für einen stationären Zustand der elektrischen Strömung, welcher in der That in dem vorliegenden Falle nicht stattfindet, da D sich mit der Zeit ändert. Neumann hat indess gezeigt, dass, wenn diese Aenderung mit einer Geschwindigkeit vor sich geht, welche im Verhältniss zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität klein ist, der obige Satz dennoch zur Geltung kommen kann.

Bewegt sich der inducirende Leiter von der Zeit t_0 bis zur Zeit t_1, so ist die gesammte Intensität des in dieser Zeit inducirten Stromes

$$I = -\,\varepsilon \lambda \int_{t_0}^{t_1} dt\, \Sigma v \Gamma d\sigma \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Ist der in dem Zeitelement dt zurückgelegte Weg dw, sind die Stellen, an denen sich der inducirende Leiter zu den Zeiten t_0 und t_1 befindet, w_0 und w_1, so ist die Geschwindigkeit $v = dw/dt$ und die Ausdrücke 1 und 2 ändern sich um in

$$D = -\varepsilon\lambda\Sigma\Gamma dw d\sigma; \qquad I = -\varepsilon\lambda\int_{w_0}^{w_1}\Sigma\Gamma dw d\sigma . \quad (3)$$

Sind die Componenten der elektrodynamischen Wirkung des von dem Strom Eins durchflossenen inducirten Leiters B auf das von dem Strom durchflossene Element $d\sigma$ resp. X, Y, Z; sind die Coordinaten von $dw = \xi, \eta, \zeta$, so ist auch:

$$D = -\varepsilon\lambda\Sigma\,(Xd\xi + Yd\eta + Zd\zeta)\,d\sigma \quad . \; . \; . \; . \quad (4)$$

$$I = -\varepsilon\lambda\int_{w_0}^{w_1}\Sigma\,(Xd\xi + Yd\eta + Zd\zeta)d\sigma \quad . \; . \; . \; . \quad (5)$$

Den Ausdruck D bezeichnet Neumann mit dem Namen Differentialstrom, den Ausdruck I als Integralstrom. — Beide Ströme sind von der Geschwindigkeit der Bewegung des inducirenden Leiters unabhängig und nur von der Lage und Länge des von ihm durchlaufenen Weges bedingt.

77 Leiten wir den inducirenden Strom in gleicher Intensität, wie vorher durch A, so jetzt durch den inducirten Drahtkreis B, und bewegen denselben gegen Leiter A, in welchem nunmehr kein Strom fliesst, genau in gleicher Weise hin, wie vorher A gegen B, so ist, wenn beide Leiter in sich geschlossen sind, die jetzt in A inducirte elektromotorische Kraft die gleiche, wie die vorher in B inducirte, da die elektrodynamische Gegenwirkung und ebenso die inducirende Kraft zwischen je zwei Elementen ds und $d\sigma$ dieselbe bleibt, wie vorher. Die Intensitäten der in beiden Fällen inducirten Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände von A und B.

Ebenso ist es gleichgültig, ob der vom Strom durchflossene Leiter A gegen den nicht vom Strom durchflossenen Leiter B, oder ob B in entgegengesetzter Richtung bewegt wird, und A ruht. Denn denken wir während der Bewegung von A gegen B den Raum bewegt, welcher beide Leiter enthält, so kann hierdurch keine Inductionswirkung zwischen ihnen entstehen. Wird diese letztere Bewegung so angeordnet, dass dadurch A absolut in Ruhe bleibt, so bleibt nur noch die der früheren Bewegung von A entgegengesetzte Bewegung von B übrig, welche jene Bewegung von A völlig in ihrer Wirkung ersetzt. — Für nicht geschlossene Leiter gelten diese Sätze nur unter gewissen Beschränkungen, wenn der ganze Kreis des inducirten Stromes dabei seine Länge nicht ändert.

78 Für die Induction eines Stromes in einem geschlossenen Stromkreise durch die Bewegung eines Magnetpoles kann man immer den Magnetpol ruhend denken und dem Leiter die entgegengesetzte Bewegung ertheilen und umgekehrt. Man kann dann den Magnetpol durch

ein Solenoid ersetzen, dessen eines Ende in der Unendlichkeit liegt, dessen anderes mit dem Magnetpol zusammenfällt.

Die elektrodynamische Wirkung eines solchen Solenoids auf ein Stromelement ist nur abhängig von der Lage seines Endes. Seine Wirkung auf einen geschlossenen Leiter ist nur eine anziehende oder abstossende; dagegen kann sie keine Rotation des geschlossenen Leiters verursachen.

Hat daher der in sich geschlossene Leiter um den Magnet- oder Solenoidpol nur eine rotatorische Bewegung, so kann in ihm kein inducirter Strom entstehen. — Ist das Solenoid begrenzt, oder hat der Magnet zwei Pole, so entsteht ebenso kein inducirter Strom in dem geschlossenen Leiter, wenn sich derselbe um eine, durch beide Pole gelegte Drehungsaxe dreht.

Hat dagegen der geschlossene Leiter eine fortschreitende Bewegung, bei welcher alle seine Elemente sich selbst parallel bleiben, so wird in ihm ein Strom inducirt, der durch die oben gegebenen Formeln dargestellt wird, wenn man in ihnen $\Gamma ds d\sigma$ durch die elektromagnetischen Kräfte ersetzt, welche von dem Magnetpole auf alle einzelnen Elemente des geschlossenen Leiters ausgeübt werden, während durch den Leiter ein Strom von der Intensität Eins fliesst. — Sind also die Coordinaten des Poles ξ, η, ζ, seine relativen Verschiebungen gegen den Leiter $d\xi$, $d\eta$, $d\zeta$, ist sein Magnetismus μ; sind die von ihm auf jedes, vom Strom Eins durchflossene Element des geschlossenen Leiters ausgeübten elektromagnetischen Wirkungen $X\mu$, $Y\mu$, $Z\mu$, so erhalten wir den in dem geschlossenen Leiter inducirten Integralstrom bei der Bewegung des Poles auf dem Wege $w_0 w_1$:

$$I = -\varepsilon\mu\lambda \int_{w_0}^{w_1} \Sigma (X d\xi + Y d\eta + Z d\zeta)\, d\sigma \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

79 Bei einem nicht in sich geschlossenen bewegten Leiterstück gestalten sich die Verhältnisse anders. Ist z. B. adc, Fig. 28, ein solches Leiterstück, so wird darauf durch den benachbarten Pol P eines Solenoids oder Magnetes sowohl ein translatorischer, als auch in Bezug auf P als Drehungsmittelpunkt ein rotatorischer Bewegungsantrieb ausgeübt, wenn man durch dasselbe einen Strom leitet.

Fig. 28.

Durch beide Bewegungen vor dem ruhenden Pol wird also in adc ein Strom inducirt. Der durch die translatorische Bewegung inducirte Strom berechnet sich nach den oben gegebenen Formeln; der durch die rotatorische Bewegung inducirte ist nur von der Lage der Endpunkte a und c des bewegten Leiterstückes abhängig. Denken wir uns durch adc einen

Strom von der Intensität Eins geleitet, und nennen die Winkel, welche die Linien Pa und Pc mit der durch P gelegten Drehungsaxe OP machen, φ_1 und ψ_1, so ist nach Bd. III, §. 150 der von P ausgehende, auf adc ausgeübte, elektromagnetische rotatorische Antrieb, wenn der Magnetismus des Poles μ ist:

$$\mu(\cos\varphi_1 - \cos\psi_1).$$

Wird daher das Leiterstück adc um den Pol P um einen kleinen Winkel $d\varrho$ gedreht, so ist der in demselben inducirte Differentialstrom:

$$D = -\varepsilon\mu\lambda(\cos\varphi_1 - \cos\psi_1)\,d\varrho.$$

Sind die Winkel, welche die Drehungsaxe mit den Coordinatenaxen macht, gleich λ, μ, ν; sind die Coordinaten des Poles ξ, η, ζ, die eines Elementes des Leiters adc gleich xyz, ist der Abstand des Poles vom Elemente gleich ϱ, so ist auch:

$$D = -\varepsilon\mu\lambda\left(\left[\cos\lambda\frac{x-\xi}{\varrho}\right]_a^c + \left[\cos\mu\frac{y-\eta}{\varrho}\right]_a^c + \left[\cos\nu\frac{z-\zeta}{\varrho}\right]_a^c\right).$$

Die eckigen Klammern deuten an, dass die in ihnen befindlichen Ausdrücke die Differenzen der Werthe sind, welche sie annehmen, wenn man in ihnen für x, y, z und ϱ die für die beiden Endpunkte a und c des Leiters gültigen Werthe einsetzt.

Ist statt eines einzelnen Poles P ein Magnet mit zwei Polen P und Q gegeben, um dessen Axe sich der Leiter adc dreht, und sind die Winkel zwischen der Axe und den nach a und c von P und Q gezogenen Linien resp. φ_1, φ_2, ψ_1, ψ_2, so wird der bei der Drehung des Leiters um den Winkel $d\varrho$ inducirte Differentialstrom:

$$D = -\varepsilon\mu\lambda[(\cos\varphi_1 - \cos\psi_1) - (\cos\varphi_2 - \cos\psi_2)]\,d\varrho.$$

Bei der Induction von Strömen in einem nicht in sich geschlossenen Leiter durch einen Solenoid- oder Magnetpol kann man nicht ohne Weiteres für die Bewegung jenes Leiters die entgegengesetzte Bewegung des Poles substituiren. Denn sind z. B. die Enden des beweglichen Leiterstückes adc durch den ruhenden Schliessungsdraht abc verbunden, in welchem sich der in adc inducirte Strom ausgleicht, so würde, wenn man den Pol an Stelle des Leiterstückes adc bewegte, auch in abc ein Strom inducirt. Soll dies nicht stattfinden, so muss der ruhende Theil abc mit dem Pol fest verbunden sein, so dass er bei der Bewegung des letzteren seine relative Lage gegen ihn beibehält. Nur in diesem speciellen Fall ist die Vertauschung der Bewegungen gestattet. — Dasselbe gilt, wenn die Induction, statt durch einen Magnetpol, durch einen in sich geschlossenen Stromkreis bewirkt wird. 80

Wird in dem soeben betrachteten Falle an Stelle des ungeschlossenen Leiters der Magnetpol bewegt, so wird sowohl durch die rotatorische, als auch durch die translatorische Bewegung desselben in Bezug auf

den Leiter in letzterem ein Strom inducirt. Denkt man sich hierbei durch den Pol eine feste Linie gezogen, welche sich bei seiner rotatorischen Bewegung um den Leiter selbst parallel im Raume verschiebt, so nimmt der Pol bei seiner Bewegung um diese feste Linie eine Drehung an. Er inducirt also auch, wenn wir diese feste Linie als Drehungsaxe ansehen, bei der Drehung des Poles um sich selbst in dem ruhenden ungeschlossenen Leiter einen Strom. (Vergl. indess §. 70.)

81 Nach Bd. III, §. 203 lassen sich die Componenten XYZ der Wirkung eines geschlossenen Stromes S von der Intensität Eins auf einen Magnetpol P von dem magnetischen Fluidum Eins (welcher also dem Ende eines einseitig unendlich verlängerten Solenoides entspricht, dessen Elementarströme den Flächenraum Eins und die Intensität Eins haben) als die partiellen Differentialquotienten der Potentialfunction des ersteren in Bezug auf den letzteren darstellen. Diese Potentialfunction V ist gegeben durch Oeffnung eines Kegels, dessen Spitze in P liegt und dessen Basis die Peripherie des Stromes S ist.

Sind die Coordinaten von P gleich ξ, η, ζ, so ist:

$$X = \frac{dV}{d\xi}, \qquad Y = \frac{dV}{d\eta}, \qquad Z = \frac{dV}{d\zeta}.$$

Führen wir diese Werthe in die Gleichung 1 (§. 78) für den durch die Bewegung des Poles in dem geschlossenen Leiter inducirten Integralstrom ein, so erhalten wir:

$$I = -\varepsilon\mu\lambda \int_{w_0}^{w_1} \left\{ \frac{dV}{d\xi}\, d\xi + \frac{dV}{d\eta}\, d\eta + \frac{dV}{d\zeta}\, d\zeta \right\}.$$

Der unter dem Integralzeichen stehende Ausdruck ist ein vollständiges Differential. Bezeichnen wir seine Werthe für den Anfangs- und Endpunkt des Weges des Poles mit V_0 und V_1, so ist:

$$I = -\varepsilon\mu\lambda (V_1 - V_0).$$

Die in dem geschlossenen Leiter durch die Bewegung des Magnetpoles inducirte elektromotorische Kraft ist also proportional dem Magnetismus des Poles und der Differenz der Potentialfunctionen des letzteren in Bezug auf den ersteren am Anfang und Ende der Bewegung.

82 Die Oeffnung des Kegels, dessen Spitze der Magnetpol, dessen Basis der geschlossene Strom ist, und welche vor und nach der Bewegung des ersteren die betreffenden Potentialfunctionen V_0 und V_1 darstellt, muss so bestimmt werden, dass unter Beibehaltung der gleichen Bewegungsrichtung des Poles auch eine entsprechende Aenderung der Kegelöffnung beobachtet wird. Nehmen wir der Einfachheit halber den geschlossenen Strom AB, Fig. 29, als eben an, und schreitet der Pol P auf der auf AB senkrech-

ten Linie CD von P gegen einen innerhalb AB gelegenen Punkt P_0 vor, so wächst allmählich die Oeffnung des Kegels APB bis zu 2π, und diese Zunahme dauert fort, wenn P durch die Ebene von AB fortschreitet bis zu einem Punkte P_1, welcher die entsprechende Lage wie vorher P hat. In diesem Punkt hat der Kegel eine durch den Werth $4\pi - APB$ dargestellte Oeffnung. Geht dagegen der Pol auf einer die Ebene AB ausserhalb des Stromkreises schneidenden Linie von P_{II} aus fort, so nimmt im Gegentheil die Kegelöffnung $AP_{II}B$ bis Null ab, wenn der Pol bis zu dem in der Ebene AB liegenden Punkt P_{III} gelangt, und wird negativ, bis sie in dem Punkt P_{IV}, welcher die dem Punkte P_{II} entsprechende Lage auf der anderen Seite der Stromesebene besitzt, den Werth $-AP_{II}B$ hat. Kehrt dann der Punkt ausserhalb AB nach P_{II} zurück, so wechselt die Kegelöffnung wieder das Zeichen und wird wiederum $AP_{II}B$. Schreitet daher der Pol ausserhalb AB von P zu einem Punkt auf der anderen Seite von AB fort und kehrt dann auch ausserhalb AB nach P zurück, so ist das Potential V_0 und V_1 am Anfang und Ende der Bewegung dasselbe, und die Intensität des gesammten, bei dieser Bewegung inducirten Stromes gleich Null.

Fig. 29.

Geht dagegen der Pol durch das Innere von AB von P aus zu einem Punkt auf der anderen Seite und kehrt dann ausserhalb AB nach P zurück, so erhält das Potential, dessen Werth am Anfang der Bewegung $APB = V_0$ war, am Ende desselben den Werth:

$$V_1 = V_0 - 4\pi.$$

Der Inductionsstrom ist in diesem Falle:

$$I = -4\varepsilon\mu\lambda\pi.$$

Geht auf diese Weise der Pol p mal von der positiven zur negativen, n mal von der negativen zur positiven Seite durch das Innere des geschlossenen Stromes hinüber, so ist der Inductionsstrom:

$$I = -4(n-p)\,\varepsilon\mu\lambda\pi.$$

Beschreibt also ein Magnetpol eine geschlossene Curve vor einem geschlossenen Stromkreise, so kann dadurch nur ein Integralstrom inducirt werden, wenn der Pol bei seiner Bewegung wenigstens einmal durch den inneren Raum des Stromkreises hindurchgeht, nicht aber, wenn er nur ausserhalb desselben eine geschlossene Bahn durchläuft.

Es ist von vornherein klar, dass die elektromotorische Kraft der Induction nur von der Aenderung des Potentials V selbst abhängt, nicht 83

aber von der Ursache dieser Aenderung. Wenn daher letztere durch ein anderes Mittel, als durch die Bewegung des Magnetpoles, oder, was dasselbe ist, durch die entgegengesetzte Bewegung des geschlossenen Leiters hervorgebracht wird, so ist die Induction die gleiche, wie vorher. — Bleibt der Magnetpol in Ruhe, ändert sich aber sein Magnetismus, so entspricht auch hier die inducirende Wirkung auf den geschlossenen Leiter der Differenz der Potentiale des Magnetes in Bezug auf den Leiter vor und nach der Aenderung. Entsteht plötzlich in der Nähe des Leiters ein Magnetpol, so ist die Aenderung des Potentials dieselbe, wie wenn der Magnetpol aus unendlicher Entfernung mit gleichbleibender Magnetisirung bis zu der betreffenden Stelle zu dem Leiter hinbewegt worden wäre.

Ist nicht ein einzelner Magnetpol gegeben, sondern ein ganzer Magnet, so kann man seine Wirkung nach aussen immer darstellen, indem man sich auf seiner Oberfläche nördliches und südliches magnetisches Fluidum nach gewissen Gesetzen angeordnet denkt. Dann gelten die oben entwickelten Gesetze auch für einen solchen Magnet. Ist $d\omega$ ein Element der Oberfläche desselben, $\mu d\omega$ das ihm zukommende Fluidum, so wird die Intensität des durch ihn in dem geschlossenen Leiter inducirten Stromes:

$$I = -\varepsilon\lambda\Sigma\mu\,(V_1 - V_0)\,d\omega.$$

Den Werth $\Sigma\mu V d\omega$ bezeichnet Neumann mit dem Namen „Potential des Leiters in Bezug auf den ganzen Magnet oder des Magnetes in Bezug auf den Leiter.“

Wird auch hier die Induction nur durch eine Aenderung des Magnetismus des ruhenden Magnetes erzeugt, dessen Oberflächenelement vor und nach derselben die freien Magnetismen $\mu d\omega$ und $\mu_1 d\omega$ enthält, so wird:

$$I = -\varepsilon\lambda\Sigma\,(\mu_1 - \mu)\,V_0 d\omega.$$

84 Mit Hülfe der eben entwickelten Ausdrücke können wir auch den mathematischen Ausdruck für die Induction eines Stromes in einem geschlossenen Leiter B durch die Annäherung eines geschlossenen Stromes A von der Intensität i berechnen. Zerlegen wir den letzteren in eine Anzahl kleiner Molekularströme vom Flächenraum $d\omega$, so kann jeder derselben durch einen kleinen, auf ihm normalen Magnet vom Moment $\frac{1}{2} i d\omega$ ersetzt werden (Bd. III, §. 142). Es sei die Länge dieser kleinen Magnete δq, wo q das vom Coordinatenanfangspunkt auf die Ebene der kleinen Ströme gefällte Loth q bezeichnet, dann ist das an den Polen der Magnete angehäufte Fluidum $\pm \frac{1}{2} i d\omega / \delta q$. Ist das Potential des einen Poles dieses Magnetes in Bezug auf den inducirten Stromkreis, welcher vom Strom Eins durchflossen gedacht wird, gleich $\frac{1}{2} i V d\omega / \delta q$, so wird, wenn man V als Function des Lothes q betrachtet, das Potential des zweiten Poles in Bezug auf den inducirten Kreis:

$$\frac{1}{2}\, i\, \frac{d\omega}{\delta q}\left(V + \frac{dV}{dq}\,\delta q\right).$$

Bei der Bewegung des geschlossenen Leiters entspricht die inducirende Wirkung beider Pole der Differenz dieser Potentiale. So erhalten wir bei der Summation für alle Elemente $d\omega$ den Integralstrom:

$$I = \frac{1}{2}\,\varepsilon i \lambda \sum d\omega\, \frac{dV}{dq}.$$

Die Grösse $\frac{1}{2} i \Sigma d\omega\, dV/dq$ bezeichnet man als das Potential des geschlossenen Leiters auf den galvanischen Strom, wobei beide Leiter von Strömen von der Intensität Eins und i durchflossen gedacht werden.

85 Die in einem geschlossenen Leiter durch die Bewegung eines geschlossenen Stromes oder umgekehrt inducirte elektromotorische Kraft ist also proportional der Differenz der Potentiale beider auf einander am Anfang und am Ende der Bewegung. Der Weg selbst, auf dem diese Bewegung vor sich geht, ist wiederum gleichgültig, da es nur auf die Anfangs- und Endlage der beiden Leiter gegen einander ankommt. Mit Hülfe derselben Betrachtungen, welche wir oben bei der Induction eines Stromes in einem geschlossenen Leiter durch einen Magnet angestellt haben, ersehen wir, dass die in einem ruhenden geschlossenen Leiter durch das plötzliche Entstehen eines galvanischen Stromes in einem benachbarten ruhenden Leiter inducirte elektromotorische Kraft ebenso gross ist, wie wenn der inducirende Leiter bei constantem Durchleiten des Stromes aus unendlicher Entfernung dem inducirten Leiter genähert worden wäre. Wir setzen dabei immer voraus, dass sich der inducirende Strom nicht momentan, sondern mit einer im Verhältniss zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektricität geringen Geschwindigkeit herstellt.

86 Nach diesen Resultaten lässt sich auch die Intensität der Extraströme berechnen. Bezeichnet I die Intensität des primären Stromes, und ändert sich dieselbe in der Zeit dt um dI, ist das Potential der inducirenden Spirale auf sich selbst, d. h. die Summe der Potentiale jeder Windung derselben auf jede Windung gleich P, so ist die in der Zeit dt inducirte elektromotorische Kraft des Extrastromes $\varepsilon P . dI/dt$. Entsteht oder vergeht der inducirende Strom vollständig, so ist die gesammte elektromotorische Kraft des dabei inducirten Extrastromes gleich $\mp \varepsilon PI$, wo das negative Vorzeichen für den Schliessungs-, das positive für den Oeffnungsextrastrom gilt. — Aus den gegebenen Ausdrücken lässt sich bei bekanntem Widerstand des Schliessungskreises des Extrastromes seine Intensität in jedem Moment seines Verlaufes berechnen (vergl. das folgende Capitel).

87 Eine genauere Untersuchung der Induction von Strömen in geschlossenen Leitern durch geschlossene und vom Strom durchflossene Leiter giebt auch über die Inductionserscheinungen Aufschluss, wenn sich die Gestalt der letzteren in irgend einer Art ändert. Dies ergeben die folgenden Rechnungen:

Ein einzelnes Element ds des inducirten Leiters lege in der Richtung o in der Zeit dt den Weg do zurück. Die elektrodynamische Wirkung des Elementes $d\sigma$ des inducirenden Leiters auf ds, wenn durch beide ein Strom Eins fliesst und sie sich im Abstand r von einander befinden, in der Richtung ihrer Verbindungslinie ist (Bd. III, §. 27):

$$\frac{ds\,d\sigma}{r^2}\left(r\frac{d^2r}{ds\,d\sigma}-\frac{1}{2}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{d\sigma}\right).$$

Um die Wirkung in der Richtung der Bewegung o zu erhalten, ist dieser Ausdruck noch mit dr/do zu multipliciren. Da die Geschwindigkeit der Bewegung do/dt ist, so beträgt nach dem Lenz'schen Satz der Integralstrom, welcher in dem Leiter s inducirt wird:

$$I=-\varepsilon\int dt\lambda i\,S\sum\frac{ds\,d\sigma}{r^2}\times\left\{r\frac{d^2r}{ds\,d\sigma}-\frac{1}{2}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{d\sigma}\right\}\frac{dr}{do}\cdot\frac{do}{dt}$$

$$=\int dt\,\lambda i\,\frac{dE}{dt}\quad\ldots\ldots\quad(1)$$

wo S und Σ die Integrationen nach ds und $d\sigma$ anzeigen und:

$$E=-\varepsilon\int S\sum dt\,\frac{ds\,d\sigma}{r^2}\left\{r\frac{d^2r}{ds\,d\sigma}-\frac{1}{2}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{d\sigma}\right\}\frac{dr}{do}\frac{do}{dt}\quad\ldots\quad(2)$$

$$=-\varepsilon\int S\sum do\,\frac{ds\,d\sigma}{r^2}\left\{r\frac{d^2r}{ds\,d\sigma}-\frac{1}{2}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{d\sigma}\right\}\frac{dr}{do}\quad\ldots\quad(3)$$

ist. Der Werth E stellt die elektromotorische Kraft dar, welche durch den vom Strom Eins durchflossenen inducirenden Leiter in der Zeit dt in dem inducirten Leiter inducirt wird. — Sind λ und i constant, so wird $I=\lambda i E$.

Nach der partiellen Integration des ersten Gliedes rechts nach s wird das Glied des dabei erhaltenen Ausdrucks, welches die Form $\frac{1}{r}\frac{dr}{d\sigma}\frac{d^2r}{do\,ds}$ hat, partiell nach o und nach dieser Integration das in dem Integral enthaltene Glied $\frac{1}{r}\frac{dr}{ds}\frac{d^2r}{do\,d\sigma}$ partiell nach σ integrirt. Man erhält dann einen Ausdruck von vier Gliedern, dessen letztes Glied dem negativen Werth von E in Gleichung (2) gleich ist. Addirt man zu demselben den Werth E, so erhält man:

$$E = -\frac{1}{2}\varepsilon\int \Sigma\, do\, d\sigma \left[\frac{1}{r}\frac{dr}{do}\frac{dr}{d\sigma}\right]_{s_1}^{s_2} + \frac{1}{2}\varepsilon \Sigma S d\sigma ds \left[\frac{1}{r}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{d\sigma}\right]_{o_1}^{o_2}$$

$$-\frac{1}{2}\varepsilon\int S\, do\, ds\left[\frac{1}{r}\frac{dr}{do}\frac{dr}{ds}\right]_{\sigma_1}^{\sigma_2}.$$

Die an den Klammern stehenden Werthe bezeichnen die Grenzen der Integrationen. Da aber der inducirende Leiter eine geschlossene Bahn haben muss, so ist $\sigma_1 = \sigma_2$ und das letzte Integral fällt fort.

Der so erhaltene Ausdruck zeigt, dass die inducirte elektromotorische Kraft unabhängig ist von den Wegen der einzelnen Elemente des bewegten Leiters, also von den Aenderungen seiner Gestalt während der Bewegung, und nur abhängig von den Bahnen, welche seine Endpunkte beschreiben, und den Formen, welche er am Anfang und Ende seiner Bewegung annimmt. Ist die Peripherie des durch jene beiden Formen und Bahnen begrenzten Viereckes $= p$, so wird die Summe der beiden ersten Integrale, also

$$E = \frac{1}{2}\varepsilon S\Sigma \frac{d\sigma\, dp}{r}\frac{dr}{d\sigma}\frac{dr}{dp}.$$

Setzt man $\frac{1}{r}\frac{dr}{dp} = \frac{1}{2r^2}\frac{d(r^2)}{dp}$ und integrirt partiell nach σ, so fällt das erste Glied des Integrales fort, da σ eine geschlossene Curve bildet, und es bleibt:

$$E = \frac{1}{4}\varepsilon S\Sigma \frac{1}{r}\frac{d^2(r^2)}{d\sigma\, dp}\, d\sigma\, dp.$$

Differenzirt man den Ausdruck:

$$r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2,$$

wo x, y, z die Coordinaten von dp und ξ, η, ζ die von $d\sigma$ sind, nach σ und p, so ergiebt sich:

$$\frac{d^2(r^2)}{d\sigma\, dp} = -2\frac{dx\, d\xi + dy\, d\eta + dz\, d\zeta}{d\sigma\, dp} = -2\cos(d\sigma, dp),$$

wo $(d\sigma, dp)$ den Winkel zwischen den beiden Elementen $d\sigma$ und dp bezeichnet. Dann ist:

$$E = -\frac{1}{2}\varepsilon S\Sigma\frac{d\sigma\, dp}{r}\cos(d\sigma, dp).$$

Der Werth $-\frac{1}{2}S\Sigma\frac{ds\, dp}{r}\cos(ds, dp)$ stellt aber das Potential zweier geschlossener Stromeskreise auf einander dar, deren Elemente $d\sigma$ und dp sind, und durch welche Ströme von der Intensität Eins fliessen (vergl. Bd.III, §. 34).

Die in einem bewegten Leiter durch einen geschlossenen Strom Eins inducirte elektromotorische Kraft E ist also gleich dem mit der Constanten ε multiplicirten Potential desselben auf den Umfang des von dem bewegten Leiter in seiner Anfangs- und Endlage und den Bahnen seiner Endpunkte begrenzten Curvenviereckes, wenn letzteres, sowie der geschlossene Leiter von einem Strom von der Intensität Eins durchflossen gedacht wird.

Dasselbe Gesetz ergiebt sich auch, wenn die Induction nicht durch einen geschlossenen Strom, sondern durch einen Magnet hervorgerufen wäre.

88 Da die Bahn des inducirten Stromes immer geschlossen sein muss, so ist, wenn nur ein Theil desselben bewegt wird, diese Bewegung nur möglich, wenn die Bahnen seiner Endpunkte in den ruhenden Theil des inducirten Kreises fallen, so zunächst, wenn derselbe aus zwei mit dem Galvanometer G, Fig. 30, verbundenen Drähten ab und cd besteht, auf denen sich der Draht ef aus der Lage ef in die Lage $e_1 f_1$ so verschiebt, dass die Länge seines zwischen ab und cd gelegenen Stückes sich nicht ändert.

In diesem Fall ist das erwähnte Curvenviereck durch $e f e_1 f_1$ dargestellt, und der Werth E ist gleich der mit ε multiplicirten Differenz der Potentiale des geschlossenen Stromkreises auf die ganze Bahncurve des inducirten Kreises in seinem Anfangs- und Endzustande, während beide vom Strom Eins durchflossen gedacht werden.

Fig. 30.

Werden diese Potentiale mit $P(\sigma_1 s_1)$ und $P(\sigma s)$ bezeichnet, so ist mithin:

$$E = \varepsilon\,[P(\sigma_1 s_1) - P(\sigma s)].$$

Ist die Intensität des inducirenden Stromes constant gleich i, so ist dieser Ausdruck mit i zu multipliciren, um die inducirte elektromotorische Kraft zu erhalten.

89 Derselbe Ausdruck giebt auch die inducirte elektromotorische Kraft an, wenn bei der Bewegung des Drahtes ef auf den Drähten ab und cd an den „Gleitstellen“ e und f neue Elemente des bewegten Leiters in den Kreis der inducirten Stromesbahn ein- oder aus derselben austreten, also die Länge des zwischen ab und cd befindlichen Stückes des Leiters ef sich ändert. — Bleibt die Länge ef bis zu einem bestimmten Zeitpunkt seiner Bewegung constant, z. B. bis ef in $e'f'$, Fig. 31, angelangt ist, und ändert sie sich dann um ein Bestimmtes, indem die Leiter ab und cd divergiren, so dass jetzt die Länge des Leiterstückes $e''f''$ ist, in der es sich bis $e'''f'''$ bewegt; so entspricht die in beiden

Zeiträumen der Bewegung inducirte elektromotorische Kraft dem Potential des inducirenden Stromes auf die Curvenvierecke $efe'f'$ und $e''f''e'''f'''$,

Fig. 31. Fig. 32.

d. i. wie oben der Differenz der Potentiale des inducirenden Stromes auf den inducirten Stromkreis in seinem Anfangs- und Endzustande.

Ganz dasselbe Gesetz gilt auch, wenn der Ein- und Austritt neuer Elemente in die Bahn des inducirten Kreises nicht nur dadurch geschieht, dass das Leiterstück ef auf den divergirenden Unterlagen fortgleitet, sondern z. B. wenn auch diese selbst dabei eine Bewegung zu- oder von einander haben, oder wenn man auf die Drähte ab und cd (Fig. 32) zwei Drähte gh und ik legt, und beide in die Lagen g_1h_1 und i_1k_1 überführt.

Auch wenn der inducirte Kreis verzweigt ist, gilt dasselbe Gesetz, indem wir denselben in eine Anzahl geschlossener Umgänge zerlegen können, in welchen bei der Bewegung des einen, dieselben begrenzenden Leiterstückes die Induction in ganz gleicher Weise geschieht, wie in einer einfachen unverzweigten Bahn.

90 Bleibt der Kreis des inducirten Stromes unverändert, während sich ein Theil des inducirenden Stromkreises bewegt, so gelten völlig dieselben Gesetze; ebenso auch, wenn Theile beider Kreise sich bewegen, da es nur auf die relative Bewegung derselben ankommt. Nur muss, wenn sich dabei die Länge des inducirenden Kreises ändert, die Intensität des Stromes in demselben constant erhalten werden. — Bei der Induction durch verzweigte inducirende Kreise muss diese Constanz in allen einzelnen Umgängen derselben bestehen.

91 Aendert sich die Intensität i des inducirenden Stromes in der Zeit dt um di, während die Elemente der beiden auf einander wirkenden Stromkreise ruhen, so ist die dadurch in der Zeit $t_1 - t_0$ erzeugte elektromotorische Kraft der Induction, wenn $P(s\sigma)$ das Potential der vom Strom Eins durchflossenen Stromkreise bezeichnet, gleich:

$$\varepsilon \int_{t_0}^{t_1} dt P(s\sigma) \frac{di}{dt}.$$

Findet zugleich noch eine Bewegung der Leiterstücke statt, so dass in der Zeit dt das Potential sich um $dP(s\sigma)/dt$ ändert, so ist die hierdurch in der Zeit $t_1 - t_0$ inducirte elektromotorische Kraft:

$$\varepsilon \int_{t_0}^{t_1} dt\, i \frac{dP(s\sigma)}{dt};$$

die durch beide Vorgänge gleichzeitig inducirte elektromotorische Kraft ist demnach:

$$F = \varepsilon \int_{t_0}^{t_1} dt \left\{ P(s\sigma)\frac{di}{ds} + i\frac{dP(s\sigma)}{dt} \right\} = \varepsilon\, [i_1 P_1(s\sigma) - i_0 P_0(s\sigma)],$$

wo i_1 und i_0, P_1 und P_0 die Werthe der Intensitäten und Potentiale zu den Zeiten t_0 und t_1 angeben, wenn der inducirte und inducirende Leiter vom Strom Eins durchflossen gedacht werden.

Die bei irgend einer Veränderung der Intensität des inducirenden Stromes oder der relativen Lage und Gestalt des inducirenden oder inducirten Stromkreises in letzterem inducirte elektromotorische Kraft ist also ganz allgemein gleich der mit der Constante ε multiplicirten Differenz der Potentiale beider Kreise auf einander in ihrem Anfangs- und Endzustande, wenn der eine von einem Strom von der jedesmaligen Intensität i_1 oder i_0, der andere von einem Strom von der Intensität Eins durchströmt gedacht wird.

92 Die Constante ε in den Formeln für die Induction kann je nach der Wahl der Einheiten der Constanten in der Ohm'schen Formel verschiedene Werthe annehmen. Bezeichnet man diejenige elektromotorische Kraft als Eins, welche in einem Drahtkreise inducirt wird, während ein zweiter Drahtkreis, in welchem ein Strom von der in einem beliebigen Maass, z. B. im elektromagnetischen Maass, gemessenen Intensität Eins fliesst, und dessen Potential auf den ersten Drahtkreis gleich Eins ist, plötzlich bis in die Unendlichkeit von dem ersten Drahtkreis entfernt wird, so wird die Inductionsconstante gleich Eins.

Wir kommen auf diesen Punkt bei der Betrachtung der absoluten Maasse der Constanten des Stromes zurück.

93 Auf einem anderen Wege hat Felici[1]) die Theorie der Inductionsströme entwickelt. Mit Hülfe des §. 30 bis 33 mitgetheilten, besonders

---

[1]) Felici, Nuovo Cimento **1**, p. 325*, **2**, p. 321, 1855*, **3**, p. 198, 1856*, **9**, p. 75, 1859*; Ann. de Chim. et de Phys. [3] **40**, p. 251, 1854*, **51**, p. 378, 1857*, **56**, p. 106, 1859*.

hierzu angestellten Versuche gelangt er auf einem ganz ähnlichen Wege, wie Ampère zu seiner Formel in Betreff der elektrodynamischen Wirkung, zu folgendem Ausdruck, welcher die elektromotorische Kraft E angiebt, die in einem Leiterelement ds_1 inducirt wird, während in einem Elemente ds ein Strom von der Intensität Eins entsteht oder verschwindet:

$$e = A\left(\frac{d^2 r}{ds\,ds_1} + K\frac{1}{r}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds_1}\right) ds\,ds_1 \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

wo r der Abstand der Elemente, A und K Constante sind. Diese Formel unterscheidet sich von der von Neumann gegebenen, zunächst für geschlossene Leiter gültigen Formel durch die unbekannte Constante K.

Gehören die Elemente ds und ds_1 in sich geschlossenen Stromkreisen an, so fällt bei der Integration das erste Glied fort, und die in dem Inductionskreise erzeugte elektromotorische Kraft ist

$$P = K\int\int \frac{1}{r}\frac{dr}{ds}\frac{dr}{ds_1}\,ds\,ds_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

wo der Werth P das Potential beider Stromkreise auf einander ist.

Dieselbe elektromotorische Kraft wäre nach den Versuchen des §. 32 inducirt worden, wenn der inducirende Kreis dem inducirten aus unendlicher Entfernung genähert oder aus seiner Lage in dessen Nähe bis zur unendlichen Entfernung von ihm entfernt worden wäre.

Wird daher der inducirende Leiter aus einer Lage in eine andere gebracht, für welche beide Lagen der Werth P resp. P_1 und P_2 ist, so ist die inducirte elektromotorische Kraft:

$$E = P_2 - P_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Diese Formel stimmt mit der von Neumann gegebenen vollkommen überein.

94 Die Gesetze der Induction, welche wir im Vorhergehenden nach F. E. Neumann entwickelt haben, folgen aus dem Princip von der Erhaltung der Energie, wie dies zuerst von Helmholtz gezeigt worden ist.

Durch irgend einen Umstand werde in einem Stromkreis vom Widerstand R, in welchem Anfangs in Folge einer in ihm wirkenden elektromotorischen Kraft E einer galvanischen Kette ein Strom von der Intensität I fliesst, ein dem Strom I entgegengerichteter Strom inducirt, wodurch die Intensität auf den Werth i hinabgedrückt wird. Da sich vor der Induction in der Zeiteinheit in der Kette zI Aequivalente Zink lösen, so ist die für die Lösung der Zinkmenge Eins in der Schliessung erzeugte Arbeit gleich $A_0 = I^2R/zI = IR/z = E/z$. Ist durch die Induction die Stromintensität auf i gesunken, so ist nun die für die Lösung der Zinkmenge Eins erzeugte Arbeit gleich $A_1 = i^2R/zi = iR/z$. Sie ist also kleiner wie vorher. Da aber die bei der Lösung der gleichen Zinkmenge Eins erzeugte Arbeit immer dieselbe A_0 sein muss, so muss neben der zur Wärmeerzeugung verwendeten Arbeit A_0 noch eine zweite

„Nebenarbeit“ A_2 auftreten, welche durch die Gleichung $A_1 + A_2 = A_0$ bestimmt, also gleich

$$A_2 = \frac{R}{z}(I - i) \text{ ist.}$$

Während der Auflösung der Zinkmenge zi, d. h. in der Zeiteinheit wird dann die Nebenarbeit $Ri(I-i)$ gethan.

In diesem Ausdruck ist $e = R(I-i)$ die durch die inducirende Kraft in der Leitung erzeugte elektromotorische Kraft, also $Ri(I-i)$ die bei der Stromintensität i durch dieselbe geleistete Arbeit $i.e$ [1]).

95 Wollen wir nun die Inductionswirkungen bei der Bewegung zweier Leiter gegeneinander und gleichzeitiger Aenderung der Stromintensität in ihnen berechnen, so ist sowohl ihre Induction auf einander, wie auch ihre Induction auf sich selbst zu beachten.

In einem bestimmten Moment sei das Potential der Leiter, wenn durch sie Ströme von der Intensität Eins fliessen, P_{12}; das Potential eines jeden auf sich selbst P_1 und P_2, die Stromintensitäten in ihnen seien i_1 und i_2, ihre Widerstände r_1 und r_2. Sind e_1 und e_2 die in ihnen bei der Induction erzeugten elektromotorischen Kräfte, so müssen die Arbeitsleistungen in den Leitern den von aussen zugeführten Arbeitsmengen gleich sein. So ist mit Berücksichtigung der Resultate des vorigen Paragraphen:

$$e_1 i_1 + e_2 i_2 = \left\{r_1 i_1^2 + i_1 \frac{d}{dt}(iP_1 + i_2 P_{12})\right\} + \left\{r_2 i_2^2 + i_2 \frac{d}{dt}(i_2 P_2 + i_1 P_{12})\right\}.$$

Da i_1 und i_2 von einander unabhängig sind, kann die Gleichung nur bestehen, wenn die Differenz der Coefficienten der gleiche Functionen von i_1 und i_2 enthaltenden Glieder überall gleich Null ist, was nicht der Fall ist, oder einzeln

$$e_1 i_1 = r_1 i_1^2 + i_1 \frac{d}{dt}(i_1 P_1 + i_2 P_{12}) \quad \dots\dots \quad 1)$$

$$e_2 i_2 = r_2 i_2^2 + i_2 \frac{d}{dt}(i_2 P_2 + i_1 P_{12}) \quad ^{2)} \dots\dots \quad 2)$$

Erhalten die Leiter in der Zeit dt einen Zuwachs an lebendiger Kraft dL, sei es durch ihre elektrodynamische Wirkung, sei es durch äussere Kräfte, welche in der Zeit dt die Arbeit dA leisten, so ist

$$dL = dA + i_1^2 dP_1 + i_2^2 dP_2 + i_1 i_2 dP_{12} \quad \dots\dots \quad 3)$$

---

[1]) Koosen, Pogg. Ann. **91**, p. 436, 1854*. — [2]) Könnte man $P_1 = P_2 = 0$ setzen, also die Selbstinduction der Leiter vernachlässigen, und ferner i_2 constant setzen, so erhielte man $i_1 = \frac{1}{r_1}\left(e_1 - i_2 \frac{dP_{12}}{dt}\right)$, so dass dann $i_2 dP_{12}/dt$ ganz die Rolle einer elektromotorischen Gegenkraft übernähme. In dieser Weise hat zuerst Helmholtz (Erhaltung der Kraft, Berlin 1847, p. 60*; Pogg. Ann. **91**, p. 255, 1854*) zunächst mit Vernachlässigung der Selbstinduction, die Inductionsgesetze aus dem Princip der Erhaltung der Kraft entwickelt. Vergl. hierüber C. Neumann, k. sächs. Ber. 20. Oct. 1871, p. 450* und Helmholtz,

Setzen wir $e_2 = 0$, sind P_1, P_2 und P_{12} constant, ändert sich also nur die Stromintensität, und ist in der einen Schliessung keine elektromotorische Kraft thätig, so folgt

$$\int_0^t e_1 i_1 \, dt = \int_0^t (r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2) dt + P_1 i_1^2 + P_2 i_2^2 + P_{12}\left(\int_0^t (i_1 d i_2 + i_2 d i_1)\right).$$

Da nach einiger Zeit i_2 verschwindet, so ist dann $P_2 i_2^2 = 0$ und das Integral des letzten Gliedes $P i_2 i_1 = 0$, und es wird nach dieser Zeit

$$\int e_1 i_1 dt = \int (r_1 i_1^2 + r_2 i_2^2) dt + P_1 i_1^2,$$

so dass die chemische Arbeit in der Kette der einen Schliessung der Wärmeerzeugung in beiden Schliessungen und ausserdem noch dem Potential $P_1 i_1^2$ der ersteren Schliessung auf sich selbst entspricht, welches wir als zur Strombildung verbraucht ansehen können [1]).

Wird der inducirende Strom geöffnet, so wird die Arbeit $P_1 i_1^2$ wieder gewonnen; die gesammte Wärmeerzeugung in den Schliessungen ist dann also der chemischen Arbeit in der Kette äquivalent.

Zur Bestimmung der in einer Spirale durch eine inducirende Spirale erzeugten elektromotorischen Kraft bedarf es der Auswerthung des Potentials beider Spiralen aufeinander, wobei man beide von einem Strom von der Intensität Eins durchströmt denkt. Man bezeichnet dieses Potential auch als den Inductionscoefficienten beider Spiralen auf einander. **96**

Ist $ds ds_1$ der Raumwinkel zwischen zwei Elementen der beiden Spiralen, r ihr Abstand, so ist der gesuchte Inductionscoefficient

$$= \frac{1}{2} \int \int \frac{\cos(ds ds_1)}{r} ds ds_1,$$

wo die Integrale über alle Elemente beider Spiralen zu nehmen sind. Die Berechnung des Inductionscoefficienten ist demnach eine Aufgabe der Mathematik. Die Ausführung der Rechnung gehört nicht hierher. Wir wollen deshalb nur das Endresultat für einige wichtige, bei den Untersuchungen über die elektromagnetischen Maasseinheiten in Betracht kommende Fälle mittheilen.

Das Potential zweier Drahtkreise von den Radien a und $a + c$, deren Ebenen um die Länge b von einander abstehen, ist annähernd **97**

$$P_{12} = 4 \pi a \left(\log \frac{8a}{\sqrt{c^2 + b^2}} - 2\right).$$

Ges. Abh. 1, p. 677*; Seydler, Sitzungsber. d. k. böhm. Ges., 6. April 1883*; Umow, Wied. Ann. 13, p. 185, 1881*; Clausius, Mechan. Wärmetheorie 2, p. 224, 1879*.

[1]) Vergl. hierüber W. Thomson, Nichols. Cyclopädia edit. 1860, Dynamic. Relations of Magnetism. Weitere Ausführungen dieses Gegenstandes Stefan, Wien. Ber. 64 [2], p. 193, 1871*; Briot, Mechan. Wärmetheorie, Deutsche Ausgabe, Leipzig 1871, p. 352 und flgde*. Aehnlich auch Mascart, Compt. rend. 90, p. 901, 1880*; Beibl. 4, p. 732*; s. auch Edlund, Pogg. Ann. 157, p. 102, 1876*.

Dieser Werth ist ein Maximum, wenn $log(8a/\sqrt{c^2+b^2}) = 7/2$ ist[1]).

Liegen die Drahtkreise in einer Ebene, so ist $b = 0$, also das Potential

$$P_{12} = 4\pi a\left(log\frac{8a}{c} - 2\right).$$

98 Hieraus folgt das Potential P einer Rolle auf sich selbst oder der Coefficient der Selbstinduction[2]). Ist der Radius der innersten Windung bis zu der Axe des Drahtes a_0, der der äussersten $a_0 + c$, b die Länge der Rolle, setzt man $a_0 + {}^1/_2 c = a$, ist n die Windungszahl, ist $x = b/c$, so ist

$$P = n^2 F\left(\frac{b}{c}\right) = 4\pi a n^2 \left\{log\left(\frac{8a}{c}\right) + \frac{1}{12} - \frac{\pi}{3}x - \frac{1}{2}log(1+x^2)\right.$$
$$\left. + \frac{1}{12}\frac{1}{x^2}log(1+x^2) + \frac{1}{12}x^2 log\left(1+\frac{1}{x^2}\right) + \frac{2}{3}\left(x - \frac{1}{x}\right) arc\, tg\, x\right\}$$

Bei genauerer Berechnung ist diesem Ausdruck noch das Glied $n^2 f(b/c)$ beizufügen, wo

$$f\left[\frac{b}{c} = x\right] = \frac{\pi c^2}{24a}\left\{\left[lg\left(\frac{8a}{c}\right) - \frac{1}{2}log(1+x^2)\right](1+3x^2)\right.$$
$$+ 3{,}45(1+x^2) + 27{,}475 - 1{,}6\pi x^3 + 3{,}2x^3 arc\, tg\, x - \frac{1}{10}\frac{1}{x^2}log(1+x^2)$$
$$\left. - \frac{13}{6}x^4 log\left(1+\frac{1}{x^2}\right)\right\} \text{ ist}^{3)}.$$

99 Besteht die Spirale aus zwei gleich weiten, einander parallelen Spiralen von den Breiten b und b_2, welche im Abstand b_1 von einander stehen, so ist ihr Potential auf sich selbst

$$p = \frac{n^2}{b^2}\left\{2b^2 F\left(\frac{b}{c}\right) + b_1^2 F\left(\frac{b_1}{c}\right) + (2b+b_1)^2 F\left(\frac{2b+b_1}{c}\right)\right.$$
$$\left. - 2(b+b_1)^2 F\left(\frac{b+b_1}{c}\right)\right\},$$

zu welchem Ausdruck event. das Correctionsglied

$$+ \frac{n^2}{b^2}\left\{2b^2 f\left(\frac{b}{c}\right) + b_1^2 f\left(\frac{b_1}{c}\right) + (2b+b_1)^2 f\left(\frac{2b+b_1}{c}\right)\right.$$
$$\left. - 2(b+b_1)^2 f\left(\frac{b+b_1}{c}\right)\right\} \text{ kommt.}$$

1) Maxwell, Treatise [2] 2, p. 316*. — Ueber das Potential zweier Spiralen auf einander als Function ihres Abstandes s. auch Christiani, Ueber die irreciproke Leitung elektrischer Ströme. Berlin 1876*. — 2) Siehe Maxwell, Phil. Trans. 155 [1], p. 508, 1865, wo nach Lord Rayleigh (Proc. Roy. Soc. 32, p. 117, 1881*) statt $-\pi/3 . cos\, 2\vartheta$ der Werth $-\pi/3 . cosec\, 2\vartheta$ zu lesen ist. Heinrich Weber, Der Rotationsinductor, Leipzig, Teubner, 1882, p. 47 u. flgde.* — 3) Vgl. in Betreff der Richtigkeit dieses Gliedes Lord Rayleigh, l. c.

Man kann die Inductionscoefficienten zweier Spiralen auf einander **100** auch auf experimentellem Wege bestimmen.

Kennt man das z. B. durch Rechnung zu findende Potential zweier vom Strom Eins durchflossenen conaxialen Spiralen A, B auf einander, wenn sie sich in verschiedenen Entfernungen von einander befinden, so schaltet man, um das Potential anderer Spiralen A_1, B_1 auf einander zu messen, A und A_1 hintereinander in den Schliessungskreis einer Säule zugleich mit einem Interruptor ein und verbindet die Spiralen B und B_1 einerseits untereinander, andererseits mit einem Galvanometer in der Art, dass die bei den Unterbrechungen des Kreises der Spiralen A und A_1 in ihnen erzeugten Ströme einander entgegenlaufen.

Durch den Interruptor werden nur die Oeffnungs- oder nur die Schliessungsinductionsströme zu dem Galvanometer geleitet. Verschiebt man die Spiralen A und B gegeneinander, bis dieses Instrument keinen Strom in B und B_1 angiebt, so ist das Potential von A_1 auf B_1 dem von A auf B gleich.

Statt des Galvanometers kann man auch ein Telephon in den Schliessungskreis der Spiralen B und B_1 einfügen; dasselbe giebt aber meist durch sein Tönen Veränderungen der Stromintensität im Stromkreise $B B_1$ auch bei den Lagen der Spiralen, in welchen das Galvanometer keinen Strom anzeigt, da die Inductionsströme in B und B_1 nicht immer gleichzeitig verlaufen, selbst wenn ihre gesammte elektromotorische Kraft die gleiche ist.

Legt man die Spirale A_1 bei diesen Versuchen fest und bringt B_1 **101** an verschiedene Stellen, wobei aber die Axen von A_1 und B_1 einander parallel bleiben, so kann man die Stellen aufsuchen, an welchen in B_1 durch den Strom in A_1 gleich starke elektromotorische Kräfte inducirt werden, und sie durch Curven verbinden. Dies sind dann Curven gleicher Induction. Wird die Spirale B_1 von einem Punkt einer dieser Curven zu einem andern Punkt derselben Curve verschoben, während durch A_1 ein constanter Strom fliesst, so wird in B_1 kein Strom inducirt. Wird B_1 von irgend einem Punkt einer Curve zu irgend einem Punkt einer andern Curve verschoben, so ist die inducirte elektromotorische Kraft die gleiche, wo auch jene Punkte auf den betreffenden Curven liegen [1]).

Auch kann man die Curve aufsuchen, in der in B_1 keine Induction stattfindet, und dadurch z. B. die Berechnung der Potentiale durch das Experiment bestätigen [2]).

Will man die Inductionscoefficienten zweier Paare von Spiralen, **102** A und a, sowie B und b (Fig. 33 a. f. S.) mit einander vergleichen, so kann man auch durch a und b den Strom einer Säule S leiten, welchen man

---

[1]) Vergl. Grant, Phil. Mag. [5] **12**, p. 330, 1881; Beibl. **5**, p. 898*. — [2]) Grant, Chem. News **19**, p. 21, 1879; Beibl. **3**, p. 645*.

durch einen Interruptor an einer Stelle unterbrechen kann und die Enden der Spiralen A und B untereinander verbinden, dass die beim Oeffnen und Schliessen des Stromes der Säule in ihnen erzeugten Inductionsströme einander entgegenlaufen. Man vereint sodann zwei Punkte der Verbindungsdrähte C und D mit einander durch einen ein Galvanometer G enthaltenden Brückendraht und verändert die Widerstände der Zweige CAD oder CBD so lange, bis das Galvanometer beim Oeffnen oder Schliessen des Interruptors keinen Ausschlag zeigt.

Fig. 33.

Sind E_1 und E_2 die Potentiale der Spiralenpaare auf einander, resp. die in A und B inducirten elektromotorischen Kräfte, sind r, r_1, r_2 die Widerstände der Zweige CGD, CAD, CBD, so ist die Intensität des Stromes in der Brücke gleich Null, wenn $E_1 : E_2 = r_1 : r_2$ ist (vergl. Bd. I, §. 623) [1].

Da die elektromotorischen Kräfte der Extraströme, welche beim Entstehen und Vergehen der in den Spiralen A und B direct inducirten Ströme in letzteren erzeugt werden, einander gleich und entgegengesetzt sind, so heben sich ihre Wirkungen auf die Galvanometernadel auf, vorausgesetzt, dass die Zeit des Verlaufes der Induction gegen die Schwingungsdauer derselben relativ klein ist.

Die zur Einstellung anzuwendenden Methoden sind dieselben, welche wir schon bei der Bestimmung der elektromotorischen Kraft und des Widerstandes erwähnt haben. Nur ist bei Einschaltung von Widerstandsrollen in die Leitungen darauf zu achten, dass in ihnen selbst keine Inductionswirkungen ausgeübt werden.

103 Der Coefficient der Selbstinduction lässt sich ebenfalls experimentell bestimmen. Kennt man den Coefficienten P_{I} der Selbstinduction einer Spirale I, und will den Coefficienten P_{II} einer zweiten Spirale II damit vergleichen, so kann man beide Spiralen in die zwei Zweige AB und BD einer Wheatstone'schen Drahtcombination, Fig. 34, einfügen, den die Säule E enthaltenden Zweig AED durch einen Interruptor unterbrechen und die Widerstände der Zweige AB, BD, DC, AC so abändern, dass die Nadel des in den Brückenzweig BC eingeschalteten Galvanometers G auf

---

[1] Vergl. Maxwell, Treatise 2 ed. 2, p. 361, 1881*. Versuche dieser Art von Brillouin (Compt. rend. 93, p. 1010, 1881*; Beibl. 6, p. 39*) über die Inductionscoefficienten geben Resultate, welche mit der Berechnung übereinstimmen.

Null bleibt. Sind die Intensitäten und Widerstände der Zweige, wenn ein constanter Strom die Brückencombination durchfliesst und dabei die Nadel des Galvanometers G auf Null steht, gleich $i_1, i_2, i_3, i_4, r_1, r_2, r_3, r_4$, wie in der Figur, so muss $i_1 = i_2$, sowie $i_3 = i_4$ und $r_1/r_2 = r_3/r_4$ sein.

Fig. 34.

Sollen sich dann beim Oeffnen oder Schliessen des die Säule enthaltenden Zweiges die Wirkungen der Extrainductionen in den Spiralen I und II aufheben, so müssen durch dieselben in B und C einerseits, sowie in A und D anderseits je gleiche und entgegengesetzte Potentialniveaux erzeugt werden. Demnach muss sein

$$\frac{P_1}{r_1}\frac{d i_1}{dt} = \frac{P_2}{r_2}\cdot\frac{d i_2}{dt}$$

oder, wenn $i_1 = i_2$ ist

$$P_1 : P_2 = r_1 : r_2 \text{ [1]}.$$

104 Eine andere Methode, bei welcher es keiner Normalspirale bedarf, ist die folgende [2]:

In einen Zweig AB der Wheatstone'schen Drahtcombination $ABCD$, Fig. 35, wird die zu untersuchende Spirale eingeschaltet. Die Verbindung des Brückendrahtes mit der übrigen Leitung bei C wird so lange verstellt, bis bei constanter Verbindung der Säule mit A und D durch das in die Brücke eingeschaltete Galvanometer kein Strom fliesst. Dann verhalten sich die Widerstände der vier Zweige AB, BD, AC und CD:

Fig. 35.

$$r_1 : r_2 = r_3 : r_4.$$

Aendert sich die Intensität im Zweige ASD, so werden sowohl in der Spirale im Zweige AB, wie in den Windungen des Galvanometers G Ströme inducirt, wodurch die Verhältnisse sich ändern. Sind dann die Intensitäten in der Brücke BGC und in den vier erwähnten Zweigen gleich i_0, i_1, i_2, i_3, i_4, und ändern sich die Stromintensitäten in den Zweigen AB und BC in der Zeit dt um di_1 und di_0, ist das Potential der Spirale in AB auf sich selbst p_1, das der Galvanometerspirale auf sich selbst p_0, so folgt aus den Gleichungen von Kirchhoff

[1] Vergl. Maxwell, l. c., p. 367*. — [2] Maxwell, Phil. Trans. 155 [1], p. 475*.

$$i_1 r_1 + i_0 r_0 - i_3 r_3 = -p_1 \frac{d i_1}{d t} - p_0 \frac{d i_0}{d t}$$

$$i_2 r_2 - i_4 r_4 - i_0 r_0 = +p_1 \frac{d i_0}{d t}$$

$$i_1 = i_2 + i_0$$

$$i_4 = i_3 + i_0$$

und da $r_1 r_4 = r_2 r_3$ ist, auch

$$i_0 [r_0 (r_4 + r_3) + r_3 (r_2 + r_4)] = - r_4 p_1 \frac{d i_1}{d t} - (r_3 + r_4) p_0 \frac{d i_0}{d t} \quad 1)$$

Wird der Strom im Zweige der Säule plötzlich geschlossen, so dass für $t = 0$ resp. $i_0 = i_1 = 0$ ist, und wird der Strom nach der Zeit τ stationär, so ist $\int_0^\tau d i_0 / dt = 0$. Die Intensität des Stromes im Zweige AB werde nach dieser Zeit $i_1 = I$.

Dann ist

$$\int_0^\tau i_0 \, dt = - \frac{r_4 I}{r_0 (r_3 + r_4) + r_3 (r_2 + r_4)} p_1 \cdot \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Da nun bei constant gewordenem Strom, wenn E die elektromotorische Kraft der Säule, R der Widerstand des Zweiges ASD ist,

$$I = \frac{(r_3 + r_4) E}{R (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (r_1 + r_2)(r_3 + r_4)} \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

ist, so folgt

$$\int_0^\tau i_0 \, dt = - \frac{r_4}{N} p . E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

wo $1/N$ das Product der Coefficienten von E und $r_4 I p$ in den beiden eben erwähnten Gleichungen ist.

Beim Oeffnen des Stromes in dem Zweige ADS ergiebt sich ebenso

$$\int_0^\tau i_0 \, dt = + \frac{r_4}{N} p . E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Der Werth des Integrals lässt sich aus der Ablenkung der Galvanometernadel direct oder nach der Multiplications- oder Zurückwerfungsmethode bestimmen; indess bietet die Bestimmung von E und von N Schwierigkeiten, weil zu viele Bedingungen einfliessen.

Um diese Bestimmung zu umgehen, wird nach Lord Rayleigh[1]) in den Zweig AB ein kleiner Widerstand Δr_1 eingeschaltet und die Kette dauernd geschlossen; erst an einer Stelle des Zweiges ASD, dann

[1]) Lord Rayleigh, Proc. Roy. Soc. 32, p. 116, 1881*.

bei B oder C. Die sich ergebende constante Ablenkung giebt dann die Intensität des Stromes in der Brücke

$$i_0^1 = \frac{r_4 \,.\, \varDelta r_1}{N_1} E \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

wo N_1 der Werth von N ist, wenn für r_1 der Werth $r_1 + \varDelta r_1$ gesetzt wird. Ist $\varDelta r_1$ klein genug, so kann $N_1 = N$ genommen werden und man erhält aus Gl. 4) und 6)

$$p = \frac{\varDelta r_1}{i_0^1} \cdot \int_0^T i_0 \, dt.$$

105 Herwig[1]) schaltet die Inductionsspiralen, deren Selbstinductionscoefficient zu bestimmen ist, in den einen der beiden Zweige eines Differentialspiegelgalvanometers ein und in den andern Zweig einen aus zwei entgegenlaufenden Hälften bestehenden Draht. Ist der Ausschlag beim Oeffnen des durch beide Zweige geleiteten Stromes gleich β, erzeugt ein constanter Strom einer Kette von der elektromotorischen Kraft E_1, welcher beide Multiplicatorhälften, deren Widerstand R_1 sei, durchfliesst, den Ausschlag α, ist R der Widerstand des Extrastromes, I die Intensität des primären Stromes, sind λ und T das logarithmische Decrement und die Schwingungsdauer des Magnetspiegels, so ist der Selbstinductionscoefficient der Spirale

$$P = \frac{R}{R_1} \frac{\beta}{\alpha} \frac{E_1}{I} \frac{T e^{\frac{\lambda}{\pi} arc\, tg \frac{\pi}{\lambda}}}{\sqrt{\pi^2 + \lambda^2}}.$$

Dabei ergab sich z. B., als eine Spirale aus zwei parallelen, resp. 0,265 und 2,18 mm dicken Drähten gewunden wurde, oder aus einem 30 mm langen, 40 mm breiten und $^1/_2$ mm dicken Kupferband und aus dem 0,265 mm dicken Kupferdraht, dass die beiden Theile jeder Spirale, trotz ihrer grossen Ungleichheit doch einen gleichen Coefficienten der Selbstinduction besassen, also wie lineare Drähte wirkten.

106 Endlich kann man auch den Coefficienten der Induction einer Spirale auf sich selbst mit dem der wechselseitigen Induction zweier Spiralen auf einander vergleichen[2]). In den Zweig ab der Wheatstone'schen Drahtcombination, Fig. 36 a. f. S., wird die auf ihre Selbstinduction zu untersuchende Spirale A, in den die Säule S enthaltenden Zweig die Spirale A_1 eingeschaltet, deren Potential P_{AA_1} auf A mit dem Potential P_A von A auf sich selbst zu vergleichen ist. Die Brücke bc wird wieder so eingestellt, dass das Galvanometer in ihr zunächst bei dauernder Schliessung keinen Strom angiebt. Dann verhalten sich also die Widerstände $r_1 : r_2 = r_3 : r_4$.

---

[1]) Herwig, Wied. Ann. 7, p. 488, 1879*. — [2]) Maxwell, Treatise [2] 2, p. 366, 1881*.

Darauf verändert man r_3 und r_4, so dass ihr Verhältniss r_3/r_4 constant bleibt, bis auch beim Oeffnen von aSd in bc kein Strom angezeigt wird.

Fig. 36.

Ist die Stromintensität in dem Zweige ab gleich i_1, in ac gleich i_3, so ist die Intensität in aSd gleich $I = i_1 + i_3$.

Aendern sich diese Intensitäten in der Zeiteinheit um di_1/dt und di_3/dt, so wird in ab durch die Induction von A_1 auf A die elektromotorische Kraft $P_{AA_1}(di_1/dt + di_3/dt)$ und durch die Selbstinduction von A die Kraft $P_A di_1/dt$ inducirt. Die Potentialdifferenz in a und b ist also gleich

$$i_1 r_1 + P_A \frac{di_1}{dt} + P_{AA_1}\left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_3}{dt}\right).$$

Ebenso ist die Potentialdifferenz in a und c gleich $i_3 r_3$. Fliesst durch bc bei dauernder Schliessung kein Strom, so ist $i_1 r_1 = i_3 r_3$. Fliesst bei momentaner Oeffnung von aSd kein Strom durch bc, so ist demnach auch

$$P_A \frac{di_1}{dt} + P_{AA_1}\left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_3}{dt}\right) = 0$$

oder

$$P_A = - P_{AA_1}\left(1 + \frac{r_1}{r_3}\right).$$

Da P_A positiv ist, muss P_{AA_1} negativ sein, d. h. der Extrastrom in A muss dem von A_1 in A inducirten entgegengerichtet sein.

107 Da die letzte Einstellung unter Beibehaltung des Gleichgewichts bei constantem Strom schwierig ist, stellt Maxwell bei einem anderen Verfahren die Brücke so ein, dass bei momentaner Oeffnung der Extrastrom in A etwas über den durch die Induction von A_1 auf A erzeugten Strom überwiegt und verbindet dann a und d durch einen Leiter r_5 von solchem Widerstand, dass die Galvanometernadel auf Null steht, wodurch die Einstellung bei constantem Strom nicht geändert wird. Dann wird:

$$P_A = - P_{AA_1}\left(1 + \frac{r_1}{r_3} + \frac{r_1 + r_2}{r_5}\right).$$

Es sind also noch mehr Widerstände als vorher zu bestimmen, wodurch die Methode viel ungenauer werden muss [1]).

---

[1]) Vergl. auch Brillouin, Compt. rend. **94**, p. 435, 1882*; Beibl. **6**, p. 397*.

Um die bei der relativen Bewegung eines Magnetes und einer Spirale, resp. beim Entstehen oder Verschwinden des Magnetismus in ersterem in der Spirale inducirte elektromotorische Kraft zu berechnen, bedarf es ebenfalls der Bestimmung des Potentials, welches aus der Summation der sämmtlichen, von verschiedenen Punkten des Magnetes zu der Spirale gezogenen Kegelöffnungen, je multiplicirt mit dem freien Magnetismus jener Punkte, abzuleiten ist. 108

Um einige Beispiele der vorerwähnten Sätze zu geben, wollen wir zunächst die Induction berechnen, welche in einem kreisförmigen Leiter vom Radius r, z. B. einem Drahtkreise, erzeugt wird, wenn sich ein Magnet von der Länge l in der Richtung der Axe desselben fortbewegt. Der Abstand des dem Leiter zunächst liegenden Poles N des Magnetes von dem Mittelpunkte desselben sei x, das magnetische Moment des Magnetes sei lm; dann sind die Kegelöffnungen der durch seine Pole als Spitze und den Drahtkreis als Basis gelegten Kegel gleich

$$2\pi\left(1-\frac{x}{\sqrt{x^2+r^2}}\right) \quad \text{und} \quad 2\pi\left(1-\frac{x+l}{\sqrt{(x+l)^2+r^2}}\right),$$

oder, wenn die Winkel zwischen der Axe des Leiters und den von den Polen zu der Peripherie desselben gezogenen Linien mit ψ und φ bezeichnet werden, $2\pi(1-\cos\psi)$ und $2\pi(1-\cos\varphi)$.

Wird der Magnet aus einer bestimmten Entfernung zu dem Leiter parallel seiner Axe hinbewegt, ist am Anfang und am Ende der Bewegung der Werth x gleich x_0 und x_1, und sind die entsprechenden Werthe von φ und ψ gleich φ_0 und φ_1, ψ_0 und ψ_1, so stellen obige Werthe der Kegelöffnungen bei Einführung dieser Grössen die Potentialfunctionen V_0 und V_1 des Leiters in Bezug auf die beiden Magnetpole dar. Ist der umgekehrte Werth des Widerstandes des Schliessungskreises des Leiters gleich λ, so ist die Intensität des Inductionsstromes

$$I = -2\varepsilon\lambda m\pi[(\cos\varphi_1-\cos\varphi_0)-(\cos\psi_1-\cos\psi_0)].$$

Wird der Magnet dem Leiter aus unendlicher Entfernung bis zu der ersten Lage genähert, oder, was auf dasselbe herauskommt, entsteht er in dieser Lage, so ist $\cos\varphi_0 = \cos\psi_0 = 1$, also dann

$$I = -2\varepsilon\lambda m\pi(\cos\varphi_1-\cos\psi_1).$$

Schneidet die Ebene des Leiters die Axe des Magnetes in der Mitte, so ist I im Maximum. Dann ist $\cos\varphi_1 = -\cos\psi_1$, also

$$I_{max} = -4\varepsilon\lambda m\pi\cos\varphi_1 = -\frac{4\varepsilon\lambda m\pi l}{\sqrt{l^2+4r^2}}.$$

Ist der Durchmesser $2r$ des Kreises klein gegen l, so verwandelt sich dieser Ausdruck in

$$I_{max} = -4\varepsilon\lambda m\pi.$$

Dann ist I von dem Durchmesser des Kreises und der Länge des Magnetes unabhängig.

Ein ähnliches Resultat, welches mit dem von Lenz (§. 27) erhaltenen übereinstimmt, ergiebt sich bei Ersetzung des Drahtkreises durch eine Spirale, deren Durchmesser gegen ihren Abstand von den Enden des inducirenden Magnetes klein ist. Auch hier ist die inducirte elektromotorische Kraft von der Weite der Drahtwindungen der Spirale auf dem Magnete unabhängig.

109 Die Berechnung der durch den Erdmagnetismus inducirten Ströme begründet sich auf die §. 82 abgeleiteten Principien, wie F. E. Neumann (l. c.) dargethan hat. Rotirt ein ebener geschlossener Leiter L, welcher den Flächenraum F umschliesst, um eine beliebige Drehungsaxe unter Einfluss des Erdmagnetismus, dessen Stärke wir mit M bezeichnen, und ist die auf der Drehungsaxe des Leiters senkrechte Componente desselben gleich N, so können wir annehmen, die Kraft N gehe von einem in der weiten Entfernung r befindlichen Pol P aus, welcher auf dem in der Richtung von N auf der Drehungsaxe errichteten Loth liege. Bildet in den verschiedenen Lagen des Leiters L ein Loth auf seiner Ebene mit N den Winkel φ, so ist die Oeffnung des durch P als Spitze und L als Basis gelegten Kegels durch den Werth $F . \cos \varphi / r^2$ dargestellt. Ist der Magnetismus von P gleich μ, so ist $\mu / r^2 = N$. Sind also in zwei Lagen des Leiters die Werthe φ gleich φ_0 und φ_1, so wird bei der Drehung aus der ersten in die zweite Lage im Leiter ein Strom inducirt von der Intensität:

$$I = \frac{\varepsilon N F}{R} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_0),$$

wo R der Widerstand des Schliessungskreises, ε die Inductionsconstante ist. Jedesmal, wenn bei der Drehung die Ebene des Leiters L auf der Richtung von N senkrecht steht, kehrt sich bei fortgesetzter Drehung die Richtung des Inductionsstromes in ihm um. In diesen je um 180° von einander abstehenden Lagen muss durch einen Commutator die Stromesrichtung in dem Schliessungsdraht von L gewechselt werden, wenn man bei seiner Drehung constante Ströme erhalten will.

In diesen Lagen ist jedesmal abwechselnd $\cos \varphi = \pm 1$. Bei einer halben Umdrehung des Leiters aus der einen in die andere Lage wird also ein Inductionsstrom von der Intensität

$$I = 2 \frac{\varepsilon N}{R} F$$

inducirt.

Liegt die Drehungsaxe des Leiters horizontal und steht senkrecht auf dem magnetischen Meridian, so ist $N = M$, also in diesem Falle

$$I_1 = 2 \frac{\varepsilon M}{R} F.$$

Fällt die horizontale Drehungsaxe in den magnetischen Meridian, so ist $N = M \sin i$, wo i der Inclinationswinkel ist, also:

$$I_2 = 2\,\frac{\varepsilon M F}{R}\,\sin i.$$

Ist die Drehungsaxe vertical, so ist $N = M \cos i$, also

$$I_3 = 2\,\frac{\varepsilon M F}{R}\,\cos i.$$

Wird dagegen der Leiter von der Stellung aus, in welcher seine Ebene mit der Richtung des Erdmagnetismus zusammenfällt, um 180° gedreht, so ist in beiden Lagen $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_0 = 0$. Man erhält also keinen Inductionsstrom.

110 Auf diesen Berechnungen beruht die Bestimmung der Inclination mittelst des Inductions-Inclinatoriums von W. Weber[1]) (vergl. §. 40).

Der Ring a (Fig. 37) besteht aus zweimal acht ringförmigen, einander parallelen Kupferblechen von 100 mm innerem und 161 mm äusserem Durchmesser, welche in der Mitte durch einen Zwischenraum von 12 mm

Fig. 37.

von einander getrennt sind. Dieser Ring ruht mittelst einer horizontalen Axe auf Frictionsrollen ff und kann durch ein Zahnradsystem $r r_1$ mit Kurbel k um die Axe gedreht werden, welche in den magnetischen Meridian eingestellt wird. In dem Ringe befindet sich eine Magnetnadel. Bei der Rotation kann nur die verticale Componente des Erdmagnetismus in dem Ringe inducirend wirken; die Wirkung des Magnetismus der Nadel ist

[1]) W. Weber, Pogg. Ann. **43**, p. 493, 1838*.

bei kleinen Ablenkungen derselben aus dem Meridian zu vernachlässigen. Bei der Drehung des Ringes mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit werden in ihm Ströme inducirt, welche die Nadel um einen bestimmten Winkel α ablenken, während gleichzeitig die horizontale Componente des Erdmagnetismus sie in ihre Ruhelage zurückzuführen strebt. Die Intensität der Ströme ist der verticalen Componente des Erdmagnetismus und der Zahl der Umdrehungen n des Ringes in der Secunde proportional.

Ist M die Gesammtintensität des Erdmagnetismus in der Richtung der Inclination, i der Inclinationswinkel, m das Moment der Nadel, so ist demnach

$$const\, n\, M m \sin i \cos \alpha = M m \cos i \sin \alpha$$

oder

$$const\, n\, tg\, i = tg\, \alpha.$$

Kennt man an einer Stelle der Erde die Inclination i, so kann man durch einen Versuch bei einer bestimmten Rotationszahl n die Constante bestimmen und dann bei der Rotation des Apparates an anderen Orten nach Beobachtung von n und α auch die Inclination i_1 daselbst messen.

Den genaueren Verlauf der Induction in einem unter Einfluss des Erdmagnetismus rotirenden Ring, wobei die Selbstinduction mitwirkt, wollen wir im Zusammenhange bei der Bestimmung der absoluten Einheit des Widerstandes besprechen.

111 Auch die Berechnung der Inductionserscheinungen bei Umkehrung der elektromagnetischen Rotationen folgt, wie F. E. Neumann gezeigt hat, unmittelbar aus seiner Theorie.

Wir beschränken uns auf die Betrachtung der bei der unipolaren Induction inducirten elektromotorischen Kraft. Es sei ns, Figur 38,

Fig. 38.

der rotirende Magnet, auf dessen Axe zwei kreisförmige Metallscheiben a und b von den Radien r und r_1 aufgesetzt sind, gegen deren Ränder die Federn c und d schleifen. Der Abstand der Scheiben a und b von dem Pole n des Magnetes sei x und x_1, die Länge des Magnetes l, sein Moment μl. Bezeichnen wir die Winkel zwischen der Axe des Mag-

netes und den Linien von seinen Polen nach den Peripherien der von den Federn c und d bei der Drehung auf a und b gezogenen Kreise mit φ_1, φ_2, ψ_1, ψ_2, so ergiebt sich die Intensität des bei einer Umdrehung des Magnetes inducirten Stromes:

$$I = 2\pi\varepsilon\mu\lambda\,[(\cos\varphi_1 - \cos\psi_1) - (\cos\varphi_2 - \cos\psi_2)].$$

Dasselbe Resultat erhalten wir mit Hülfe des §. 87 u. flgde. erwähnten Satzes, wenn wir uns den Magnetpol ruhend und statt seiner das Leiterstück cGd rotirend denken. Das von dem inducirten Stromkreise bei einer Umdrehung umschlossene Viereck wird durch die Peripherien der von c und d auf a und b gezogenen Kreise dargestellt, welche wir uns in entgegengesetzter Richtung von dem Strome von der Intensität Eins umflossen denken. Die inducirte elektromotorische Kraft entspricht also der Differenz der mit $\mu\varepsilon$ multiplicirten Potentialfunctionen der Magnetpole auf beide Peripherien, welche, wie im vorigen Paragraphen, sich durch $2\pi(1 - \cos\varphi_1)$, $2\pi(1 - \cos\psi_1)$, $2\pi(1 - \cos\varphi_2)$ und $2\pi(1 - \cos\psi_2)$ darstellen. Bei der Subtraction dieser Werthe von einander und Multiplication mit der Leitungsfähigkeit λ des inducirten Kreises erhalten wir den obigen Ausdruck.

Liegt das eine Ende des Leiters, z. B. c, in der Rotationsaxe, so ist $\varphi_2 = \psi_2 = 0$, also

$$I = 2\pi\varepsilon\lambda\mu(\cos\varphi_1 - \cos\psi_1) = 2\pi\varepsilon\lambda\mu\left\{\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} - \frac{l + x}{\sqrt{r^2 + (l + x)^2}}\right\}.$$

Befindet sich die Scheibe b auf der Seite des Magnetpoles s, in der Entfernung x von demselben auf der Axe, so ist für x der Werth $-(l + x)$, also für $l + x$ der Werth $-x$ zu setzen. Man erhält also für die Stromintensität den gleichen Werth. Die Intensität des inducirten Stromes ist die gleiche und gleich gerichtet.

Liegt die Metallscheibe b zwischen den Magnetpolen, so ist x negativ. Das Maximum der Stromintensität erhält man, wenn $x = -\frac{1}{2}l$, also die Scheibe in der Mitte des Magnetes liegt. Dann ist

$$I = -\frac{4\varepsilon\lambda\mu\pi l}{\sqrt{4r^2 + l^2}}.$$

Auch hier ist die Stromesrichtung die gleiche wie vorher.

112 Letzteres Resultat hat Zöllner[1]) bestätigt, indem er in der Axe einer vertical aufgestellten Spirale einen Glasstab rotiren liess, welcher einen ⌈ förmigen, mit seinem verticalen, dicht an der Spirale heruntergeführten Ende in eine kreisförmige Quecksilberrinne tauchenden Kupferdrahtbügel trug. Der obere centrale Theil des Bügels war durch einen Quecksilbernapf und ebenso die Quecksilberrinne mit einem Spiegelgalvanometer verbunden. Reichte der verticale Schenkel des Bügels nur

[1]) Zöllner, Pogg. Ann. **160**, p. 604, 1877*.

bis dicht unter den oberen oder bis dicht an den unteren Rand der Spirale, an welche beide Stellen die Quecksilberrinne gebracht war, so war bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit der Ausschlag des Galvanometers der gleiche; reichte er bis zu der in der mittleren Höhe der Spirale angebrachten Rinne, so war er bedeutender.

Ruht der Magnet mit den Scheiben und dreht sich die Leitung dGe in gleichem Sinne, wie vorher die Scheiben, so müssen, wie bereits erwähnt, dieselben Verhältnisse eintreten, nur dass die Inductionsströme in entgegengesetzter Richtung fliessen, da es nur auf die relative Bewegung der Leitung dGe und des Magnetes mit den Scheiben ankommt.

113 In ähnlicher Weise lässt sich die Induction in dem §. 63 beschriebenen Versuche berechnen, da bei jeder Umdrehung des rotirenden Radius der ganze Drahtkreis in die Schliessung eintritt. Die inducirte elektromotorische Kraft ist gleich dem Potential des vom Strom von der betreffenden Intensität I durchflossenen Drahtkreises auf die umgebende Spirale.

114 An diese Resultate schliesst sich ein Versuch von Felici[1]) unmittelbar an.

Ueber dem Pole eines Elektromagnetes befindet sich eine kreisförmige Metallscheibe, deren Axe mit dem einen Ende des Galvanometerdrahtes verbunden ist. An den Rand der Scheibe ist das eine Ende des Drahtes einer Spirale gelöthet, welche andererseits gleichfalls mit dem Galvanometer verbunden und so aufgestellt ist, dass in ihr beim Erregen des Magnetes kein Strom inducirt wird. Wird nun, während der Magnet constant wirkt, die Metallscheibe gedreht, so dass sich ein Theil des Drahtes der Spirale auf ihre Peripherie aufwickelt, so zeigt das Galvanometer keinen Inductionsstrom an. — Bei diesem Versuche ist der Draht der Spirale aus einer Lage, in welcher bei Erregung des Magnetes kein Strom in ihr inducirt wird, in eine solche Lage übergegangen, in welcher die inducirende Wirkung ein Maximum ist. Zugleich gleitet aber auch in jedem Augenblicke das sich aufwickelnde Ende des Drahtes auf der Peripherie der Scheibe.

Die durch letzteren Process bewirkte Induction ist also, wie der Theorie entspricht, der durch den ersteren erzeugten Induction gerade gleich und entgegengesetzt. —

115 Wir wollen noch die Induction eines in sich geschlossenen Solenoides auf einen Leiter bestimmen.

Um eine in sich geschlossene, irgend wie gekrümmte Linie als Axe seien kleine, überall gleich grosse, ebenfalls in sich geschlossene Ströme

---

[1]) Felici, Nuovo Cimento, **1**, p. 325, **2**, p. 321, 1855, **3**, p. 198, 1856, **9**, p. 75, 1859*; Ann. de Chim. et de Phys. [3] **40**, p. 251, 1854, **51**, p. 378, 1857, **56**, p. 106, 1859*.

von gleicher Intensität und gleicher Gestalt je im Abstande Eins von einander gelegt. Ersetzt man dieselben durch unendlich kleine, auf ihnen senkrechte und also überall gleiche Magnete, so wirkt das geschlossene Solenoid nach aussen nicht inducirend, also auch nicht auf einen geschlossenen Stromkreis, welcher nicht wie ein Glied einer Kette das andere, den vom Solenoid umschlossenen Flächenraum durchschneidet. Findet aber letzteres statt, so wird bei Stromänderungen im Solenoid ein Inductionsstrom erzeugt, obgleich das Solenoid in beiden Fällen nach aussen nicht ponderomotorisch wirkt [1]).

Während im ersten Falle das Potential des Solenoids auf den daneben befindlichen Stromkreis Null ist, also beim Oeffnen und Schliessen des Stromes im Solenoid in dem neben demselben befindlichen Drahtkreis keine elektromotorische Kraft inducirt wird, ist das Verhalten im zweiten Falle ein anderes.

Durch den Drahtkreis fliesse ein Strom von der Intensität Eins. Dann können wir ihn nach Roiti [2]) durch eine von ihm begrenzte, sonst beliebig gestaltete magnetische Doppelfläche ersetzen, welche das Solenoid senkrecht zu seiner Axe schneidet. Auf alle ausserhalb des Ringraumes des Solenoids liegenden Theile dieser Fläche übt dasselbe keine Wirkung aus, wohl aber auf die innerhalb liegenden Theile. Ist der freie Magnetismus der die Elementarströme des Solenoids darstellenden Magnete gleich i, so ist diese Kraft an jedem Punkt gleich $\pm 4\pi i$ (vergl. Bd. III, §. 381), also auf die den ganzen Ringquerschnitt a des Solenoids erfüllenden Theile der Magnetfläche gleich $4\pi i a$. Ist die Zahl der Elementarströme des Solenoids auf der Längeneinheit gleich n, so ist diese Kraft $4\pi n i a$. Entsteht also der Strom i im Solenoid, während in dem dasselbe durchziehenden Schliessungskreise kein Strom fliesst, so ist die darin inducirte elektromotorische Kraft gleich $4\pi n i a$. Ist der Schliessungskreis m mal um das Solenoid herumgeführt, so ist sie $4\pi n m i a$.

116 Bildet das Solenoid eine Revolutionsfläche um eine auf seiner Aequatorialebene senkrechte Axe (die Axe der z) und sind die einzelnen Querschnitte $z \,.\, d\varrho$ durch die durch die Z-Axe gelegten Ebenen um ϱ von derselben entfernt, so nimmt auch der Abstand der Elementarströme von einander von der Mitte aus im Verhältniss von ϱ zu. In demselben Verhältniss muss man die Molecularmagnete länger, aber auch schwächer nehmen, welche die Elemente $z\,d\varrho$ ersetzen. So wird die inducirte elektromotorische Kraft

$$V = 4\pi n m i \int \frac{z}{\varrho}\, d\varrho.$$

Ist die Zahl der Windungen auf dem ganzen Solenoid gleich μ, so ist $n = \mu / 2\pi$, ist ferner der Widerstand des inducirten Kreises R, so

---

1) Felici, l. c., §. 114. — 2) Roiti, Nuovo Cimento [2] 11, p. 35, 1874*.

wird die Stromintensität in demselben beim Oeffnen oder Schliessen des Stromes im Solenoid

$$I = \frac{2m\mu i}{R}\int \frac{z}{\varrho}\, d\varrho.$$

Von der Gestalt der Windungen des das Solenoid durchsetzenden Schliessungskreises ist diese Intensität unabhängig.

117 Ist der Ringquerschnitt des Solenoids kreisförmig, ist der innere und äussere Radius des dasselbe bildenden Ringes resp. gleich d und d', so wird

$$I = \frac{2m\mu i}{R}(\sqrt{d'} - \sqrt{d})^2.$$

Ist der Ringquerschnitt ein Rechteck, dessen Höhe gleich b, dessen innerer und äusserer Ringradius resp. d_1 und d_1' ist, so wird

$$I = \frac{2m_1\mu_1 i_1}{R_1} b \,.\, log\, nat\, \frac{d_1'}{d_1},$$

wo $m_1\, \mu_1\, i_1\, R_1$ die jetzigen Windungszahlen, die Intensität des Stromes im Solenoid und den Widerstand des inducirten Kreises bezeichnen.

118 Versuche, bei denen ein Solenoid mit kreisförmigem und ein anderes mit rechteckigem Querschnitt in denselben Schliessungskreis eingeschlossen waren und die Zahlen μ und μ_1 der Windungen der sie durchsetzenden inducirten Spiralen abgeändert wurden, bis sich die in ihnen inducirten Ströme gerade aufhoben, entsprachen vollständig der theoretischen Berechnung.

Bei Solenoiden mit gleichem Ringquerschnitte müssen sich, wie auch die Versuche zeigen, die Zahlen der Umwindungen des inducirten Drahtes umgekehrt wie die Windungszahlen des Solenoids verhalten, um cet. par. bei entgegengesetzter Verbindung der inducirten Kreise mit einem Galvanometer keinen Anschlag desselben zu geben. Ebenso müssen sich die Umwindungen des inducirten Drahtes umgekehrt wie die Intensitäten der Ströme in den inducirenden Solenoiden verhalten, damit die beiderseits inducirten elektromotorischen Kräfte gleich sind.

119 Auch die folgenden Resultate von Roiti[1]) entsprechen ganz der Theorie.

Bildet man einen Holzring aus einzelnen conaxialen, sechsseitigen Holzrahmen, deren Seiten gegen einander beweglich sind, und welche die Kupferdrahtwindungen tragen, so entsteht in einem durch den Ring geleiteten Draht oder in einer um denselben herumgelegten Inductionsspirale ein Inductionsstrom, wenn der Ring zwischen zwei flachen Platten gepresst, die Windungen also abgeflacht werden. Schliesst man den den Ring um-

---

[1]) Roiti, Nuovo Cimento [2] 13, p. 170, 1875*.

fliessenden Strom vor einer Deformation der Windungen, sei es, dass sie dadurch flacher, oder wieder weiter werden, und öffnet ihn nach derselben, so ist, wie vorauszusehen, die Stärke des Inductionsstromes beim Schliessen gleich der Summe der Intensitäten der bei der Deformation und beim Oeffnen erhaltenen Ströme.

Wird ein Solenoid auf einen Holzring gewunden, welcher an einer Stelle durchbrochen ist, und ein mit einem Galvanometer verbundener Draht durch die Unterbrechungsstelle von aussen hindurchgeschoben, so erhält man einen Inductionsstrom, der ebenso stark ist, wie wenn bei der endlichen Lage des Drahtes der Strom im Solenoid entstände. Beim Entfernen des Drahtes durch die Unterbrechungsstelle entsteht der entgegengesetzt gerichtete Strom.

Auch wenn in den Solenoiden ein in sich geschlossener Eisendraht als Axe liegt, ändern sich die Resultate nicht, wenn der Draht an allen Stellen gleiche Structur hat [1]). Legt man also um ein solches Solenoid zwei verchieden gestaltete Drahtschlingen, verbindet sie in entgegengesetzter Richtung einerseits mit einander, andererseits mit einem Galvanometer, so zeigt letzteres beim Oeffnen oder Schliessen des Stromes in der Spirale des Solenoids keine Ablenkung.

---

[1]) Vergl. Felici, Nuovo Cimento [2] 11, p, 53, 1873*.

Zweites Capitel.

Einfluss der inducirten Ströme auf den zeitlichen Verlauf der elektrischen Ströme in linearen in sich geschlossenen Leitern.

I. Einfluss der inducirten Ströme auf die Zeitdauer des Entstehens und Verschwindens der galvanischen Ströme und ihre Wirkungen.

a) Zeitlicher Verlauf.

120 Wird der Schliessungskreis einer constanten galvanischen Säule plötzlich geschlossen, so fällt die Zeit, in welcher die Intensität des in demselben entstehenden Stromes bis auf eine constante Grösse anwächst, mit der Zeit der Schliessung zusammen, wenn nicht in dem Schliessungskreise selbst inducirte Ströme entstehen. Wir nehmen dabei vorläufig an, dass die Zeit verschwindend klein sei, innerhalb deren die freien Elektricitäten auf der Oberfläche der Leiter sich in der Art anhäufen, wie es zur Herstellung des constanten Stromes erforderlich ist, so dass an den einzelnen Stellen jedes Stromkreises und in demselben Moment die Intensität des Stromes überall gleich gross ist und die Schwankungen derselben an jenen Stellen überall gleichzeitig stattfinden. Wir berücksichtigen demnach vorläufig auch nicht die Zeit, deren die Inductionswirkung bedarf, um sich von einem Theile einer irgend wie inducirten unverzweigten Leitung auf einen anderen Theil derselben fortzupflanzen. Wir wollen ferner annehmen, dass die Zeit, in der die Induction sich von einem inducirenden auf einen inducirten Leiter durch die Luft oder einen anderen Körper fortpflanzt (abgesehen von secundären Inductionswirkungen durch letzteren), verschwindend klein ist, und endlich, dass die Elektricitätsquelle, durch welche die in die Leiter ein-

strömende Elektricität geliefert wird, constant ist, dass also z. B. das Potential der Elektricitäten an den Polen einer galvanischen Säule constant bleibt, wenn sie durch einen Draht oder eine Drahtspirale geschlossen wird, in der sich Extraströme bilden u. s. f.

Endlich wollen wir die Inductionswirkungen der geradlinigen Theile der Leitung auf einander vernachlässigen.

Werden die Pole einer galvanischen Säule durch eine Drahtspirale verbunden, so werden in letzterer während des Entstehens des Stromes Extraströme inducirt, welche ihm entgegengerichtet sind und sein Anwachsen bis zu seiner constanten Maximalintensität verzögern. Die Art, in welcher das allmähliche Ansteigen des Stromes stattfindet, ist von Helmholtz[1]) unter den oben angeführten Bedingungen theoretisch und experimentell untersucht worden. 121

Die Intensität des Stromes sei in jedem Moment an allen Stellen I, die elektromotorische Kraft des primären Stromes E, der Widerstand des Schliessungskreises W, das Potential der in demselben befindlichen Spirale auf sich selbst P; das Widerstandsmaass sei so gewählt, dass die Inductionsconstante $\varepsilon = 1$ ist, dann ist die elektromotorische Kraft des inducirten Stromes in jedem Moment $-P dI/dt$, also die gesammte Intensität des Stromes in demselben Moment gegeben durch die Gleichung:

$$IW = E - P\frac{dI}{dt},$$

d. i. wenn die Zeit t vom Beginn der Schliessung an gezählt wird:

$$I = \frac{E}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{P}t}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Nach dieser Formel lässt sich die Intensität I des Stromes für die ersten Zeiten der Schliessung berechnen. — Ströme von verschiedenem Widerstand W und W_1 und Potential P und P_1 erhalten gleiche Procente ihrer endlichen Intensität zu Zeiten t und t_1, welche sich verhalten wie

$$t : t_1 = \frac{P_1}{W_1} : \frac{P}{W} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1\text{a})$$

Bei längerer Schliessung nähert sich die Intensität I immer mehr dem Werth $I_m = E/W$, welchen der Strom ohne Einfluss der Induction besässe.

Die Gesammtintensität F des Stromes von Anfang der Schliessung an bis zur Zeit t ergiebt sich aus Formel 1):

$$F = \int_0^t I dt = \frac{E}{W}\left\{t - \frac{P}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{P}t}\right)\right\} \quad \ldots \quad 2)$$

[1]) Helmholtz, Pogg. Ann. 83, p. 505, 1851*.

Die Gesammtintensität des Extrastromes aber, welche sich von der Intensität E/W des primären Stromes bis zu seiner völligen Constanz subtrahirt, ist:

$$-\frac{E}{W}\int_0^\infty e^{-\frac{W}{P}t}dt = -\frac{PE}{W^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

Wird der Schliessungskreis geöffnet, nachdem die Stromintensität darin constant geworden ist, so kann der Oeffnungsextrastrom nur so lange andauern, als noch nach der Unterbrechung in dem entstehenden Funken ein Uebergang von Materie an der Unterbrechungsstelle die Leitung vermittelt.

122 Wird dagegen zur Zeit t nach der ersten Schliessung die den Strom liefernde Säule von der Spirale losgelöst, dafür aber die letztere durch eine Leitung von gleichem Widerstand, wie der der Säule, geschlossen, so ist der Widerstand des neu gebildeten Schliessungskreises der gleiche, W, wie vorher. Durch denselben fliesst der Extrastrom, welcher durch das Verschwinden des im Moment des Oeffnens vorhandenen Stromes inducirt wird. Die Intensität I_0 dieses Stromes zu verschiedenen Zeiten t folgt aus der Gleichung

$$I_0 = -\frac{P}{W}\frac{dI_0}{dt}.$$

Sie ist demnach zur Zeit t nach der Loslösung gleich $\frac{E}{W}e^{-\frac{W}{P}t}$, also die Gesammtintensität des Oeffnungsinductionsstromes bis zur Zeit t:

$$O = \frac{E}{W}\int_0^t e^{-\frac{W}{P}t}\,dt = \frac{PE}{W^2}\left(1 - e^{-\frac{W}{P}t}\right).$$

Geschieht die Umschaltung erst, nachdem der Strom constant geworden ist, d. h. zur Zeit $t = \infty$, so ist $O = PE/W^2$, d. h. der Oeffnungsextrastrom hat dieselbe Gesammtintensität, aber die entgegengesetzte Richtung, wie der Schliessungsextrastrom.

Fügt man neben einer Spirale in den Schliessungskreis der Säule noch ein Galvanometer ein, schliesst den Kreis erst und ersetzt kurz darauf, nach der Zeit t, die Säule durch eine Schliessung von gleichem Widerstand, so fliessen durch das Galvanometer die beiden Ströme

$$F + O = G = \frac{E}{W}t \quad \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

welche beide, wenn die Zeit t klein ist, gegen die Schwingungsdauer der Nadel des Galvanometers, letztere nahezu in ihrer Ruhelage treffen.

Aus dem Werthe G kann der Werth t berechnet werden, und wiederum der Werth F, der auch direct beobachtet werden kann, so dass

die Intensität des Stromes am Anfang seiner Schliessung in jedem Moment genau bestimmt ist.

123 Für die Versuche ist es zweckmässig, dass das Ansteigen der Intensität zum Maximalwerth I_m langsam erfolgt, also die Zeit t, innerhalb deren der Strom eine bestimmte Intensität I erreicht, lang ist. Nach Formel 1 a) tritt dies ein, wenn der Bruch W/P klein ist, also erstens W klein ist, d. h. der Widerstand der Schliessung möglichst gering ist; zweitens das Potential P gross ist. Letzteres könnte man einmal erreichen, indem man bei gleich bleibendem Gewicht des Drahtes der Spirale seine Länge ver$n$facht. Dadurch wird aber sowohl W, als auch P auf das n^2fache gesteigert und W/P bleibt unverändert. Man muss daher der Spirale möglichst viele, recht eng gewundene Windungen geben.

124 Befindet sich in der Spirale noch ein Eisenkern, z. B. aus Blumendraht, so dass in seiner Masse selbst keine Inductionsströme entstehen können, und er so seinen Magnetismus ohne Zeitverlust annimmt, so werden auch beim Anwachsen des letzteren in der Magnetisirungsspirale Inductionsströme erzeugt, welche sich von dem Hauptstrom subtrahiren. Ist dann das Potential des Magnets auf die Spirale gleich p, ist der durch den Strom von der Intensität I erzeugte Magnetismus m, so ist die Intensität des Stromes in jedem Moment:

$$IW = E - P\frac{dI}{dt} - p\frac{dm}{dt}.$$

Ist m proportional der Stromintensität I zu setzen, was innerhalb gewisser Grenzen annähernd statthaft ist, also gleich $m = \alpha I$, so ist auch:

$$IW = E - P_1\frac{dI}{dt},$$

wo $P_1 = P + \alpha p$ ist. Wir erhalten so mit Veränderung der Constanten P in P_1 dieselben Resultate wie in §. 122.

125 Neben der Spirale S, Fig. 39, befinde sich noch eine Nebenschliessung b in dem Stromkreise der Säule K; zur Zeit $t = 0$ werde die Säule im Punkte α mit der Nebenschliessung und Spirale verbunden.

Fig. 39.

Bezeichnet man die Intensitäten und Widerstände der drei Zweige mit i_a, w_a, i_b, w_b, i_c, w_c, die elektromotorische Kraft der Säule mit E, ist P das Potential der Spirale auf sich selbst, so ist die in ihr in jedem Moment inducirte elektromotorische Kraft gleich $-P di_c/dt$. Man hat also zur Zeit t:

$$i_a = i_b + i_c.$$

$$E - i_a w_a = i_b w_b, \quad P \frac{d\,i_c}{dt} + i_c w_c = i_b w_b,$$

d. i., wenn $w_a w_b + w_b w_c + w_c w_a = r$ gesetzt wird:

$$E w_b - i_c r - P(w_a + w_b)\frac{d\,i_c}{dt} = 0$$

und

$$i_c = \frac{E w_b}{r}\left(1 - e^{-\frac{rt}{P(w_a + w_b)}}\right),$$

woraus sich i_a und i_b berechnen lassen.

Wird zur Zeit t der Stromkreis c, etwa bei γ, geöffnet, so kann der Oeffnungsextrastrom in c nicht zu Stande kommen, und der Ausschlag eines vor die Spirale S gestellten Magnetes entspricht der Gesammtintensität des Stromes in c von Anfang der Schliessung bis zur Zeit t:

$$F_c = \int_0^t i_c dt = \frac{E w_b}{r} t - \frac{w_a + w_b}{r} P i_c \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Oeffnet man dagegen zur Zeit t den Zweig a in einem Punkte α, so bildet sich der Oeffnungsextrastrom und durchfliesst die Zweige b und c mit einer Intensität gleich $P i_c / (w_b + w_c)$. Die Gesammtwirkung des Stromes in der Spirale auf den Magnet von Anfang der Schliessung an ist dann:

$$G_c = F_c + \frac{P i_c}{w_b + w_c} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Durch diese Formeln ist der ganze Verlauf des Ansteigens der Intensität des Stromes vom Anfang der Schliessung an gegeben.

126 Die Prüfung der Formeln 2) bis 6) §. 121 bis 125 wurde von Helmholtz auf experimentellem Wege vorgenommen.

Für den ersten Fall der Formeln 2) und 3), bei denen keine Nebenschliessung in den Stromkreis eingefügt war, wurde der Strom einer Säule von vier Daniell'schen Elementen durch einen Multiplicator geleitet, dessen Widerstand 30mal so gross war, als der der Säule, und welcher zugleich als Inductor und strommessender Apparat diente. Vor demselben war ein mit einem Spiegel versehener Magnet aufgehängt. Der Strom wurde zuerst dauernd durch den Multiplicator geführt, indess dabei seine Intensität durch eine Nebenleitung bedeutend geschwächt. Die Ablenkungen des Magnetes ergaben die Grössen E und W. Sodann wurde der Magnet möglichst zur Ruhe gebracht, so dass sein halber Schwingungsbogen nur eine kleine Grösse α besass. Im Moment, wo er durch die Ruhelage passirte, wurde der Strom durch eine besondere Wippe geschlossen und sodann wieder durch dieselbe geöffnet, oder auch mit dem Oeffnen zugleich durch einen besonderen Draht von gleichem Widerstand, wie der der Batterie, wieder geschlossen. Der Ausschlag des Mag-

netes betrage jetzt β. Die Gesammtintensität I des Stromes während der Zeit seiner Schliessung ergiebt sich aus der Formel:

$$I = \frac{HT}{\pi} (\beta - \alpha),$$

wo T die Schwingungsdauer des Magnetes, H die horizontale Componente des Erdmagnetismus ist [vergl. Bd. III, §. 336, Gleichungen 1) u. 3)]. Die Wippe, welche zum Oeffnen und Schliessen des Stromes diente, bestand im Wesentlichen aus einem Hebel von Elfenbein *ab*, Fig. 40, welcher durch ein Gewicht *E* hinuntergedrückt, durch einen Vorreiber *uw* aber in die Höhe gehalten wurde. Der Hebel trug zwei mit den Quecksilbernäpfen *s* verbundene Metallplatten *ms*, welche unter *m* in zwei, durch

Fig. 40.

Schrauben hoch und nieder zu stellende Goldkuppen endeten. Unter diesen lagen die Enden zweier um 90° gegen den Hebel *ab* gedrehter, um die Stützpunkte *ee* beweglicher Hebel *A* und *B* von Elfenbein, deren Enden *c* durch Federn in die Höhe gehalten waren. Diese Hebel trugen zwei von einander isolirte Metallplatten *cf* und *gd*. Die Platten *cf* tragen bei *c* Goldplättchen, gegen welche die Kuppen *m* beim Hinunterfallen des Hebels *ba* stiessen. Dadurch wurden die Hebel *cd* bei *c* hinuntergedrückt und bei *d* gehoben. Die Enden *f* der Platten *cf* communicirten mit den Quecksilbernäpfen *r*. Ebenso waren die Enden *g* der Platten *gd* mit den Quecksilbernäpfen *q* verbunden. Die Enden *d* derselben trugen an einer Schraube wiederum Goldkuppen, welche in der Ruhelage der Hebel gegen darunter liegende Goldplatten drückten; diese letzteren waren durch kleine Klemmschrauben *k* mit den Quecksilbernäpfen *p* verbunden.

Wir wollen die Buchstaben auf der linken und rechten Seite der Figur durch die Indices l und r bezeichnen. Wird eine Säule zwischen s_l und r_l eingeschaltet, s_l mit p_r, r_l mit r_r verbunden und zwischen r_r und q_r das als Inductor dienende Galvanometer eingeschaltet, so wird, wenn die Goldkuppe m_l etwas höher steht als m, beim Hinunterfallen des Hebels ab zuerst der Stromkreis bei m_l geschlossen, sogleich darauf wieder bei d_r geöffnet. Der Ausschlag des Galvanometers giebt dann den Werth F (§. 121, Gleichung 2). Wird dagegen zwischen s_r und q_r noch eine Nebenschliessung von gleichem Widerstand mit der zwischen s_l und r_l befindlichen Säule eingefügt, so fliesst beim Oeffnen des Stromkreises bei d_r der im Galvanometer inducirte Strom durch den Kreis $q_r s_r a_r r_r$; die Ablenkung giebt den Werth G (§. 122, Gleichung 4). Aus letzterem lässt sich die Zeit t zwischen dem Schliessen und Oeffnen des Stromes, und aus dieser wiederum F berechnen.

In Folge der Fortpflanzungszeit der Bewegung in den Hebeln cd erfolgt das Auffallen der Goldkuppen m auf die Platten c und das Abheben der Kuppen d von den unter ihnen befindlichen Platten nicht ganz gleichzeitig. Um die dazwischen verlaufende Zeit z zu bestimmen, wurde ein Strom durch das Auffallen von m_r auf a_r geschlossen und durch das Abheben von d_l von der darunter liegenden Platte geöffnet und der Ausschlag des Galvanometers bestimmt. Es ergab sich die Zeit $z = 0{,}000337$ Secunden.

Würde bei Einschaltung der Nebenschliessung zwischen q_r und s_r die Schliessung des Stromkreises bei m_l und die Oeffnung desselben bei m_r gleichzeitig erfolgen, so würde hiernach der Ausschlag des Galvanometers doch nur 1,832 Scalentheile betragen haben.

Auf diese Weise ergab sich bei Bestimmung der Werthe G, t (in $^1/_{100}$ Secunde) und F

G	t	F beob.	F ber. aus G
0,981	0,038	0,356	0,324
3,869	0,103	1,950	1,797
6,500	0,162	3,723	3,724
10,867	0,260	7,862	7,550
15,876	0,372	12,731	12,336
24,762	0,566	21,062	21,101

127 Bei den Versuchen, wo von vornherein eine Nebenschliessung besteht, und welche zur Prüfung der Formeln 5) und 6) §. 125 dienten, war nur eine Schliessung und darauf folgende Oeffnung des Stromes, nicht aber die Zwischenschaltung einer Nebenschliessung erforderlich, und die oben erwähnte Zeit z konnte nicht so störend einwirken. Bei diesen

Versuchen stellte Helmholtz die Wippe vertical und änderte nur den Hebel *ab*, Fig. 41, ab. Derselbe trug an seinem einen Ende das Gewicht E und an dem anderen Ende b einen kleinen Arm η, welcher mit einem in der Spirale ϑ liegenden Eisencylinder verbunden war. Ausserdem war an ihm der kupferne Arm $n\gamma$ angebracht, von dem ein Kupferdraht ausging, welcher bei δ in das Quecksilbernäpfchen ε eintauchte, und dessen Spitze γ von Platin über einer reinen Quecksilberoberfläche ζ schwebte. Wurde durch die Spirale ϑ ein Strom geleitet und geöffnet, so fiel der Hebel durch das Gewicht E nach vorn über, der Stromkreis wurde zwischen den Quecksilbernäpfen ε und ζ geschlossen und gleich darauf stiess der Hebel bei b gegen den daneben liegenden Hebel *cd*, der den Schliessungskreis, in welchen die Quecksilbernäpfe q und p, Fig. 40, eingefügt waren, öffnete.

Fig. 41.

Bei Anwendung dieser Wippe wurden mit Einfügung einer constanten Nebenschliessung die Werthe F_c und G_c bestimmt. Die Säule bestand dabei aus 2 mal 4 hinter einander verbundenen Daniell'schen Elementen, die Inductionsspirale aus einem 64 m langen Draht; ihr innerer und äusserer Durchmesser betrug 20 mm und 87 mm, ihre Höhe 40 mm. Als Nebenschliessung diente ein 1,5 m langer, zickzackförmig auf einem Brett befestigter Draht. — Die Intensität der Ströme wurde gemessen, indem die Ablenkungen eines an einem Coconfaden parallel der Grundfläche der Inductionsspirale aufgehängten Magnetstäbchens bestimmt wurden. — Die Wippe schloss erst den die Säule enthaltenden Zweig a (vergl. Fig. 39) und öffnete dann denselben oder den die Inductionsspirale enthaltenden Zweig c.

Nach Einführung einiger Vereinfachungen in die Rechnung wurde der wahrscheinliche Werth des Potentials P aus den Versuchen berechnet; die Widerstände w_c und w_b wurden mit denen eines bestimmten Drahtes d verglichen, sowie die elektromotorische Kraft E und der Widerstand w_a aus den constanten Ablenkungen des Magnetes abgeleitet, welche sich ergaben, als in den Zweig c statt der Spirale zwei verschiedene Drähte m und n eingefügt wurden, und dann die Spirale als Nebenleitung von n, und endlich Draht d in den Zweig a eingefügt war.

So ergab sich als Mittel vieler Beobachtungen, von denen wir nur einige aufnehmen:

G	*F* beob.	*F* ber.	Zeit *t*
80,775	67,243	67,391	0,01569
70,567	56,877	57,234	0,01379
58,640	45,470	45,562	0,01163
40,945	28,783	28,727	0,00844
29,025	18,360	18,086	0,00629
20,560	11,157	10,998	0,00463
12,802	5,370	5,317	0,00303
8,160	2,735	2,551	0,00201

Durch die sehr gute Uebereinstimmung der beobachteten und berechneten Werthe von *F* ist die Richtigkeit der oben aufgestellten Formeln bewiesen.

128 Auch auf Veranlassung von Felici[1]) sind diese Verhältnisse experimentell geprüft worden. Derselbe hat hierzu einen besonderen Interruptor construirt, welcher gestattet, die verschiedenen Theile eines Inductionsstromes getrennt zum Galvanometer zu führen.

Auf einer 0,47 m langen, 0,20 m breiten, in der Mitte von einem 0,23 m langen, 0,03 m breiten Schlitz durchbrochenen Eisenplatte stehen zwei kleine eiserne Säulen *SS*, zwischen denen sich ein um die Axe *OO* drehbarer Hebel dreht. Vier feste und in der Längsrichtung der Eisenplatte verschiebbare Messingständer *MM* (von denen nur zwei in der Figur gezeichnet sind) tragen messingene, in der Verticalebene sich verschiebende Schlitten *A* von 0,08 m Höhe und 0,05 m Breite, auf denen einmal ein um die Axe *o* drehbarer, 0,08 m langer Hebel von Stahl *l* und dann eine Hartgummiplatte *g* befestigt ist. Auf dem Hebel verschiebt sich ein Messingstück *m*, die Gummiplatte trägt einen in einer Fassung *a* auf und nieder zu stellenden Messingstab *ss*, gegen den bei richtiger Stellung *m* gerade gegenschlägt. *m* und *s* sind sorgfältig auf einander geschliffen und geputzt. Durch Klemmschrauben *h* und *r* können *m* und *s* in einen Schliessungskreis eingeschaltet werden. Ausserdem ist zwischen *A* und *l* nahe der Axe eine leichte Spiralfeder gelöthet, um die metallische Verbindung zwichen beiden zu sichern. Eine Feder *z* drückt den Hebel *l* gegen *s* hin, wenn er nicht durch den Sperrhaken *c* festgehalten wird. Die Schlitten auf den vier Messingstücken *M* sind so gestellt, dass auf der linken Seite der Figur der Hebel *l* mit den

[1]) Felici, N. Cimento [2] **12**, p. 115, 1874*.

elfenbeinernen Vorsprüngen des darauf aufgeschraubten Schiebers *g* den Schluss zwischen *m* und *s* bei der Hebung und auf der rechten bei der Senkung unterbricht. Um den Hebel *L* in seine Ruhelage zurückzuführen, wird er ganz im Kreise herumgeführt. Durch den Schlitz *f* kann eventuell ausserdem der Stab eines Pendels gesteckt werden, welchen man in die Mitte des Hebels *LL* einschrauben und ihm dadurch eine constante Geschwindigkeit ertheilen kann. Das Pendel kann dann nach einer Elongation angehalten werden.

Fig. 42.

Auf die Axe des Hebels *L* ist ausserdem ein schwerer Cylinder *Q* von 0,09 m Radius und 0,03 m Breite und ein auf der anderen Seite aufgesetztes Gegengewicht geschraubt, so dass schon bei geringen Anstössen mit der Hand durch den Hebel die Contacte gleichmässig unterbrochen werden. Die Zeiten der Unterbrechung an den vier Contactstellen werden durch die Einstellung der Schieber *A* verändert.

Um die Zeiten zu bestimmen, wird die Oberfläche des Cylinders *Q* berusst. Man lässt gegen dieselbe eine (in der Figur nicht gezeichnete) Feder *T* schleifen, welche entweder an dem in einem bestimmten Tempo oscillirenden Anker eines Wagner'schen Hammers oder an einer elektromagnetisch erregten Stimmgabel befestigt ist. Diese Apparate schiebt man zu beliebiger Zeit an den Cylinder heran.

Die Schieber *A* mit den Hebeln *l* werden so eingestellt, dass die Axen von *l* mit der Axe des Hebels *L* etwa in einer Horizontalebene liegen. Legt man die Hebel *l* mit ihren Contacten *m* gegen die Lager *s*, lässt die Feder *T* auf dem Cylinder *Q* ohne Erregung des zeitmessenden

Apparats schleifen und dreht den Hebel L langsam, bis er nach einander gerade die Krümmung des einen und anderen Hebels l berührt, so verzeichnet die Feder zwischen je zwei Contacten Striche von messbarer Länge, deren Vergleichung mit den bei Erregung des zeitmessenden Apparats und schneller Drehung des Hebels L auf dem Cylinder verzeichneten Schwingungscurven die Zeitdauer zwischen der Oeffnung der verschiedenen Contacte zu messen gestattet.

Man muss sich vor dem Versuch überzeugen, ob sich nicht durch festere Pressung die Contacte zwischen m und s ändern, anderweitig müssen sie neu geputzt, oder der Druck der Feder z muss verstärkt werden.

Will man durch den Apparat einen Stromkreis schliessen und nach einer gewissen Zeit öffnen, so leitet man den Strom durch die Klemmschrauben r und h eines der Ständer, während die Contacte s und m einander berühren. Zwischen dieselben wird als Nebenschliessung eine Leitung N, z. B. eine Spirale, mittelst der Klemmschrauben eingefügt. Wird der Contact zwischen s und m durch den Hebel unterbrochen, so fliesst der Strom durch die Leitung N. Sollte der Contact sm nicht genügend sein, so dass durch N noch vor dem Oeffnen ein beträchtlicher Stromestheil fliesst, so können s und n noch erst mit den entsprechenden Contactstücken s^1 und n^1 eines zweiten, ebenfalls durch den Hebel L zu öffnenden Contactes verbunden werden, an dem dann erst als Nebenschliessung die Leitung N angefügt wird. Auch ohne diese letztere Vorrichtung zeigte sich, als eine Leitung N auf die angeführte Weise geschlossen und sodann mittelst Einschaltung eines zweiten Contactes in dieselbe nach einer gewissen Zeit durch den Hebel l geöffnet wurde, dass der Ausschlag des in die Leitung eingefügten Galvanometers der Zeit der Schliessung proportional war. Der Apparat erfüllte also seinen Zweck. Man kann durch denselben eine inducirende Spirale mit oder ohne Eisenkern zu bestimmten Zeiten öffnen oder schliessen und einzelne Theile des dadurch in einer Inductionsspirale inducirten Stromes durch ein Galvanometer leiten u. s. f.[1]).

129 Mittelst dieses Apparates haben Bazzi und Corbianchi[2]) die Formeln von Helmholtz geprüft. Um den Verlauf der Oeffnungsextraströme zu messen, war ein Ruhmkorff'sches Inductorium in einen von der Hauptleitung einer Kette abgeleiteten Zweig eingefügt. In einem bestimmten Moment wurde der Strom an einer Stelle zwischen der Säule und der Ableitung unterbrochen, so dass nur der Extrastrom I_a

---

1) Ein anderer durch ein herabrollendes Gewicht mit Pendelregulirung bewegter Interruptor mit Schleifcontacten auf rotirenden Walzen mit treppenförmigen Metallanlagen, durch welchen in regelmässigen Zeitintervallen nach einem bestimmten Gesetz ein Strom beliebig kurze Zeiten geschlossen werden kann. S. Bartoli, Memorie della Accad. di Lincei [3] 6, p. 1, 1882*; Beibl. 7, p. 33, 1883*. — 2) Bazzi u. Corbianchi, N. Cimento [3] 4, p. 239, 1878*; Beibl. 3, p. 373*.

allein vom Moment der Schliessung an durch den Interruptor in das Galvanometer trat. — Für den Schliessungsextrastrom I_s wurde das Inductorium und das Galvanometer in denselben Stromkreis eingefügt, letzterer in einem gegebenen Moment mit der Säule verbunden und in einem späteren geöffnet. Die Intensitäten entsprachen den Formeln $I_a = a\,10^{-\beta t}$, $I_s = bt - a(1 - 10^{-\gamma t})$.

Auch hat Bazzi[1]) die Summe des totalen Wärmeeffects des primären Stromes eines Inductoriums während einer gewissen Zeit des variablen Zustandes und des gleichgerichteten Extrastromes beim Entfernen der Kette und Ersatz derselben durch einen gleichen Widerstand mit Hülfe des Interruptors von Felici gemessen. Die nach der Formel von Helmholtz berechneten Intensitäten und daraus nach der Formel von Joule abgeleiteten Wärmeerzeugungen stimmen mit der Erfahrung, so dass also auch für die variable Periode der inducirten Ströme das Joule'sche Gesetz gilt. 130

Oscillatorische Entladungen können die Einfachheit dieser Phänomene wesentlich beeinträchtigen[2]).

Cazin und Bertin haben den Einfluss des inducirenden Stromes auf die elektrolytischen Wirkungen eines oft unterbrochenen Stromes verfolgt. 131

Leitet man einen Strom durch einen strommessenden Apparat, z. B. ein Voltameter und einen Interruptor, welcher ihn n mal in der Zeiteinheit, und zwar jedesmal während der Zeit t schliesst, so ist die in der Zeiteinheit zersetzte Wassermenge

$$A_{\mathrm{I}} = nAt = n\frac{E}{W}t,$$

wo A die in der Zeiteinheit durch den ununterbrochenen Strom zersetzte Wassermenge, E die elektromotorische Kraft und W der Widerstand des Schliessungskreises ist und die Intensität des Stromes durch die Elektrolyse gemessen wird. Ist in den Schliessungskreis an Stelle eines Theils der Leitung eine Spirale von gleichem Widerstand eingeschaltet, deren Potential auf sich selbst P ist, so ist nach Gleichung 2) §. 121 bei ebenso vielen Unterbrechungen die Gesammtintensität, also die zersetzte Wassermenge:

$$A_{\mathrm{II}} = \frac{nE}{W}\left[t - \frac{P}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{P}t}\right)\right]$$

und die Differenz

$$A_{\mathrm{I}} - A_{\mathrm{II}} = \frac{nEP}{W^2}\left(1 - e^{-\frac{W}{P}t}\right).$$

---

[1]) Bazzi, Atti della R. Accad. dei Lincei; Trasunti [3] 6, p. 298, 1882*; Beibl. 6, p. 953*. — [2]) Blaserna, ibid. p. 299, 1882*; Beibl. 6, p. 953*.

Wird in die Spirale ein Eisenkern eingeschoben, in welchem selbst keine Inductionsströme entstehen, so treten an Stelle von P und A_{II} andere Werthe P_1 und A_{II}'.

Bei wachsender Zeit t jeder Schliessung nähern sich also bei gleicher Zahl n der Unterbrechungen in der Zeiteinheit unter sonst gleichen Verhältnissen die Differenzen $A_I - A_{II}$ und $A_I - A_{II}'$ einem Maximalwerth nEP/W^2 oder nEP_1/W^2, welcher mit der Zahl der Unterbrechungen n und mit der Intensität $I = E/W$ des Stromes in der ununterbrochenen Schliessung proportional wächst, mit zunehmendem Gesammtwiderstand W der Schliessung aber bei gleichbleibender Intensität I und gleichem n proportional W abnimmt. Aendert man nur den Widerstand W, lässt aber die elektromotorische Kraft E und die Zahl der Unterbrechungen n constant, so ändert sich der Maximalwerth umgekehrt proportional dem Quadrat von W. Gelangt der Extrastrom nicht zu völliger Entwickelung, so weichen die Werthe $A_I - A_{II}$ und $A_I - A_{II}'$ um so weniger vom Maximum ab und sind relativ um so grösser, je grösser bei gleicher Schliessungszeit t der Widerstand W der Leitung ist. In gleicher Weise ist in diesem Fall der Unterschied zwischen A_{II}' und A_{II}, d. h. zwischen den mit und ohne Anwendung des Eisenkerns zersetzten Wassermengen unter sonst gleichen Verhältnissen relativ um so grösser, je kleiner W ist.

132 Die ersten Sätze hat Cazin[1]) bestätigt, indem er einen Schliessungskreis, der eine Säule, eine vom Strom durchflossene Spirale und einen Wasserzersetzungsapparat enthielt, durch einen Quecksilberinterruptor von Ruhmkorff (vergl. das Cap. Inductorien) unterbrach. Der über dem beweglichen Hebel des Apparates hin und her oscillirende Stab trug einen Stift, welcher auf einem, an demselben in verticaler Richtung vorbeigeführten Papierstreifen die Zahl der Oscillationen in Curven verzeichnete.

Die Spirale war aus einem 1,5 mm dicken und 500 m langen Kupferdraht gewunden und hatte 35 Lagen von je 33 Windungen. In dieselbe konnte ein Bündel von 100 Eisendrähten von 40 cm Länge und 3 mm Durchmesser eingelegt werden.

Wurde bei gleicher Zahl n der Unterbrechungen ohne Einschaltung der Spirale die Zeitdauer t jeder Schliessung grösser, so wuchs die zersetzte Wassermenge A_I, welche mithin t misst. Die nach Einschaltung der Spirale bei gleicher Unterbrechungsart erhaltenen Werthe A_{II} sind in folgender Tabelle gegeben. Ein Eisenkern war nicht in die Spirale eingelegt.

A_I	0,414	0,712	0,716	1,493	2,857	3,213
A_{II}	0,176	0,420	0,430	1,166	2,520	2,973
$A_I - A_{II}$	0,238	0,292	0,286	0,327	0,337	0,240

[1]) Cazin, Compt. rend. **59**, p. 564, 1864*, **60**, p. 738, 1865*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **17**, p. 418, 1869*.

Aehnliche Resultate ergaben sich, als die Stromintensität, statt durch das Voltameter, durch die Tangentenbussole bestimmt wurde. — Auch bei Einlegen des Eisenkerns folgten die analogen Resultate, so dass das Maximum der Verminderung $A_{I} - A_{II}'$ der mittleren Stromintensität deutlich zu erkennen ist.

Ist der Interruptor so gestellt, dass die Verminderung der Stromintensität durch den Extrastrom ein Maximum erreicht, so ist dasselbe nach obigen Resultaten proportional der Zahl n der Unterbrechungen in der Zeiteinheit. Sie betrug z. B. hierbei:

$A_{I} - A_{II}$	0,171	0,445	0,255
n	215	566	330
$const\ n/(A_{I} - A_{II})$	1257	1271	1296

Auch der Einfluss des Gesammtwiderstandes W der Schliessung bei dem Maximum der Stromverminderung wurde entsprechend den oben gefundenen Gesetzen bestätigt. Derselbe wurde bestimmt, indem die Stromintensität I einmal direct, nur unter Einfügung von W, sodann die Intensität i bei Hinzufügung eines Platindrahtes von bekanntem Widerstand a gemessen wurde. Es ergab sich der Werth $(A_{I} - A_{II})\ W/I = Const$, wo also die Constante dem Potential P entspricht.

Da bei diesen Versuchen der Strom mit seiner durch die Inductionsströme veränderten Intensität sowohl die Säule, wie auch das Voltameter durchfliesst, so müssen die chemischen Wirkungen in der Säule und im Voltameter einander äquivalent sein. In der That sind nach Cazin die in den Elementen der angewandten Daniell'schen Säule und in dem in die Schliessung eingeschalteten Kupfervoltameter abgeschiedenen Kupfermengen gleich.

133 Bertin[1]) hat ähnliche Versuche angestellt. Der Strom einer Säule von z Bunsen'schen Elementen ging durch einen Rheostaten, eine graduirte Tangentenbussole, einen Commutator, einen Unterbrecher und eine Drahtspirale und 2 × 370 Windungen von 2 mm dickem Kupferdraht, deren Höhe 209 mm, deren Durchmesser 150 mm betrug. In dieselbe konnte ein hohler Eisenkern eingeschoben werden. Die Unterbrechungen geschahen durch einen vermittelst eines Wagner'schen Hammers bewegten Quecksilberinterruptors, dessen Oscillationen auf einer geschwärzten Walze vermittelst einer daran schleifenden Feder gleichzeitig mit denen einer Stimmgabel notirt wurden. Wiederum war die Differenz $I_{I} - I_{II}$ der Gesammtintensität des unterbrochenen Stromes mit und ohne Einschaltung der Spirale bei gleichbleibendem Widerstand in beiden Fällen dem Quadrat der Stromintensität I des ununterbrochenen Stromes und bei derselben Säule und demselben Widerstand proportional der Zahl n

[1]) Bertin, Nouv. Opuscules, Mém. de la société des sc. nat. de Strasbourg. 6, p. 5, 1865*. Vergl. auch Matteucci, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 54, p. 297, 1858*.

der Unterbrechungen, so dass also $\varepsilon(I_{\text{I}} - I_{\text{II}})/nI^2 = const$ ist, wie der Theorie entspricht.

Wird der Eisenkern in die Spirale eingefügt, und ist hierbei die Intensität des unterbrochenen Stromes I_{III}, wenn dieselbe unter den gleichen Bedingungen ohne Eisenkern I_{II} ist, so ergiebt sich empirisch, dass $\varepsilon(I_{\text{II}} - I_{\text{III}})/nII_{\text{III}}$ nahe constant ist.

Wird die Schliessung so kurz gemacht, dass die Extraströme nicht völlig ablaufen können, so ist der Werth $\varepsilon(I_{\text{I}} - I_{\text{II}})/nI^2$ nicht mehr constant, sondern wächst, wie die folgende Tabelle ergiebt, entsprechend der Theorie, mit dem Widerstand der Schliessung, also mit der Zahl der Elemente der Kette ε und dem Widerstande r des Rheostaten in der Schliessung:

ε	$r = 0$	$r = 6$	$r = 15$	$r = 45$
2	0,332	0,432	0,532	—
4	0,400	0,500	0,584	0,668
6	0,527	0,543	0,623	0,685

Da der Oeffnungsextrastrom nur sehr kurze Zeit dauert, so kann auch der Oeffnungsfunken keinen wesentlichen Einfluss auf die mittlere Intensität der Ströme haben, wie man ihn auch ändert. So liess Cazin[1]) die Funken vor einer kreisförmigen rotirenden Scheibe vorbeischlagen, auf welcher im Kreise herum in gleichen Abständen Perlen befestigt waren. Die Geschwindigkeit der Scheibe wurde so regulirt, dass das bogenförmige Bild der Funken in den Perlen stets dieselbe Länge zu haben schien. Sie wurde durch den Ton beim Schleifen einer Saite an einem die Scheibe treibenden Zahnrad bestimmt. Aenderte sich hierbei die Dauer des Funkens von 0,0008 bis 0,0050 Secunden, so schwankte die Intensität des Stromes, multiplicirt mit der Zahl der Funken doch nur zwischen den Zahlen 376, 320, 398, 367,5 um die mittlere Zahl 354, auch wenn die Dauer der Funken durch Einfügen von Alkohol oder Wasser oder Verbindung eines Condensators mit den Elektroden der Unterbrechungsstelle abgekürzt wurde.

134 Wird der Strom einer Säule S, Fig. 43, durch einen Interruptor bei a geöffnet und geschlossen, wobei die beiden Elektroden der Unterbrechungsstelle durch einen Leitungsdraht verbunden sind, und dabei abwechselnd in den die Säule enthaltenden Zweig ein gerader Draht oder eine Spirale von gleichem Widerstand mit letzterem eingeschaltet, so lässt sich in beiden Fällen das Verhältniss der Stromintensitäten in jenem Zweig und in dem Verbindungsdraht an der Unterbrechungsstelle berechnen[2]).

Es seien I_{I} und I_{II} die Intensitäten des Stromes in dem Zweig der Säule, i_{I} und i_{II} die Intensitäten in dem Verbindungsdraht mit und ohne

[1]) Cazin, Compt. rend. **60**, p. 738, 1865*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **17**, p. 418, 1869*. — [2]) Cazin, l. c.

Einschaltung der Spirale, R sei der Widerstand des Zweiges der Säule bei Schliessung des Interruptors, dessen Widerstand verschwindend sei, ϱ der Widerstand des Verbindungsdrahtes, also $R_I = R + \varrho$ der Widerstand der ganzen Leitung bei Oeffnung des Interruptors, E die elektromotorische Kraft der Säule, P das Potential der Spirale auf sich selbst, T die Zeit der Schliessung, T_1 die der Oeffnung des Interruptors, n die Zahl der Unterbrechungen in der Zeiteinheit; dann ist bei Einschaltung eines geraden Drahtes:

Fig. 43.

$$I_I = nE\left(\frac{T}{R} + \frac{T_1}{R_1}\right); \qquad i_I = nE\,\frac{T_1}{R_1} \quad . \quad 1)$$

Ist bei Einschaltung der Spirale die Stromintensität in dem Schliessungszweig der Säule während der Schliessung und Oeffnung des Interruptors in jedem Moment I_{II} und i_{II}, so ist $I_{II}R = E - PdI_{II}/dt$, $i_{II}R_I = E - Pdi_{II}/dt$, unter der Bedingung, dass für $t = 0$ bei Beginn der Schliessung $I_{II} = E/R_I$ und für $t = 0$ bei Beginn der Oeffnung $i_{II} = E/R$ ist. Hieraus folgt:

$$\left.\begin{aligned} I_{II} &= nE\left(\frac{T}{R} + \frac{T_I}{R_I}\right) - nPE\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_I}\right)^2 \\ i_{II} &= nE\,\frac{T_I}{R_I} + \frac{nPE}{R_I}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_I}\right), \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

wenn T und T_1 so gross sind, dass beim Einsetzen der Grenzen T und T_1 die in den Werthen I_{II} und i_{II} enthaltene Exponentialgrösse gleich Null gesetzt werden kann. Aus den Gleichungen 1) und 2) folgt:

$$\frac{I_{II} - I_I}{i_{II} - i_I} = \frac{\varrho}{R}.$$

Directe Versuche von **Cazin**, bei welchen die Intensitäten durch eine Tangentenbussole gemessen wurden und der Strom 475 mal in der Minute unterbrochen wurde, bestätigen diese Beziehung. Es ergab sich u. A.:

I_I	I_{II}	i_I	i_{II}	R	ϱ	$(I_I - I_{II})R$	$(I_I - i_{II})\varrho$
0,7813	0,6903	0,2125	0,2843	0,518	0,588	0,0471	0,0422
0,7142	0,5828	0,1539	0,2209	0,520	1,011	0,0681	0,0677
1,5766	1,1234	0,2067	0,3278	0,554	2,006	0,2511	0,2429
1,6494	0,6040	0,1524	0,1853	1,487	2,008	0,0675	0,0662

135 Befindet sich neben einer primären inducirenden Spirale eine durch eine Leitung *in sich geschlossene* Inductionsspirale, so würde ohne die Extraströme der in der Inductionsspirale inducirte Schliessungs- und Oeffnungsstrom das Maximum seiner Intensität gleichzeitig mit dem Schliessen und Oeffnen des Stromes der primären Spirale annehmen.

Beim Schliessen derselben wird indess schon durch die Extraströme das Ansteigen der Intensität des inducirenden Stromes bis zu seiner constanten Stärke I verzögert, und so auch in gleicher Weise die Bildung des Schliessungsinductionsstromes in der Inductionsspirale. Zugleich aber entstehen in letzterer Spirale selbst Extraströme, indem der Inductionsstrom darin allmählich bis zu einem Maximum anwächst. Da sie dem Inductionsstrom entgegengesetzt sind, so verzögern sie seine Entwickelung noch mehr. Wenn daher auch die Gesammtintensität desselben durch ihren Einfluss ungeändert bleibt — sie muss stets der Gesammtänderung der Stromintensität in der primären Spirale von Null bis I entsprechen —, so ist doch seine Zeitdauer verlängert, seine Intensität in jedem einzelnen Moment seines Verlaufes verringert.

In der primären Spirale werden endlich auch rückwärts durch das Anwachsen des Stromes in der Inductionsspirale und das Verschwinden desselben Ströme inducirt, welche in dem ersten Theil des Verlaufes des Inductionsstromes ihm entgegen, im zweiten ihm gleichgerichtet sind, sich also anfangs zu dem primären Strom addiren, später aber von demselben subtrahiren.

So wird hierdurch ebenfalls die Zeit des Anwachsens des primären Stromes geändert. Er steigt anfangs steiler an, als wenn die Inductionsspirale sich nicht neben der primären Spirale befände, nähert sich aber später langsamer seinem Maximum.

Als daher Bertin bei seinen Versuchen (§. 133) den primären Strom so schnell unterbrach, dass die Schliessungsextraströme noch nicht völlig ablaufen konnten, wuchs die Menge des in gleichen Zeiten in dem primären Kreis der Säule zersetzten Wassers, wenn er um die in denselben eingefügte Spirale noch eine in sich geschlossene Spirale legte.

Wird die Inductionsspirale neben der primären Spirale geöffnet, so fällt der letztere Grund der Veränderung des Ansteigens des inducirenden Stromes fort.

Wie eine in sich geschlossene Inductionsspirale wirken in sich geschlossene, cylindrische Metallhüllen, welche die primäre Spirale umgeben, oder massive Metallkerne, welche in sie hineingeschoben werden. Sind die Metallhüllen der Länge nach aufgeschnitten, so fehlt für die Inductionsströme in ihnen die geschlossene Bahn, sie können sich nicht bilden und auf die Entwickelung des primären Stromes zurückwirken.

Beim Oeffnen des primären Stromes sinkt seine Intensität schnell auf Null; die Inductionsströme in der secundären Spirale steigen schnell bis zu ihrem Maximum an und sinken dann in Folge der bei ihrem Verschwinden inducirten gleichgerichteten Extraströme in der secundären Spirale allmählich bis auf Null. In der primären Spirale würde, wenn sie geschlossen bliebe, der Inductionsstrom der secundären Spirale beim Entstehen einen ihm selbst entgegengerichteten, also auch dem primären Strom entgegengesetzten, beim Verschwinden einen demselben

wiederum gleichgerichteten tertiären Strom induciren. Da indess die primäre Spirale gerade bei der Bildung der Inductionsströme geöffnet wird, kann nur ein Theil der tertiären Ströme in ihr zur Ausgleichung kommen, so lange noch der Oeffnungsfunken die Leitung herstellt; also namentlich der dem primären Strome entgegengerichtete tertiäre Strom. Der dem primären Strome gleichgerichtete Oeffnungsextrastrom wird dadurch geschwächt, der Oeffnungsfunken z. B. wird kleiner.

Aehnliche Erscheinungen treten auf, wenn durch Oeffnen oder Schliessen einer Nebenleitung zur inducirenden Spirale die Intensität des Stromes in jener Spirale geändert wird, und dadurch in einer benachbarten Inductionsspirale ein Strom entsteht.

136 Die eben erwähnte Zeitdauer der inducirten Ströme hat unter Anderen Guillemin[1]) dargethan, indem er durch einen Disjunctor einen Schliessungskreis schloss oder öffnete, welcher eine Säule und eine Drahtspirale von 600 m Kupferdraht von $^1/_4$ mm Dicke enthielt. Die letztere war umgeben mit einer Inductionsspirale, welche durch einen Eisendraht von $^1/_3$ mm Dicke und 300 m Länge geschlossen war. Durch den Disjunctor wurde zu verschiedenen Zeiten nach dem Schliessen des inducirenden Stromes eine Nebenschliessung an der Inductionsspirale angebracht, indem ihre mit dem Eisendraht verbundenen Enden mit einem Galvanometer verbunden wurden. Der Schliessungs- sowie der Oeffnungsstrom dauerte in einem Versuch etwa 0,005 Secunden an. Bei Einlegen eines Eisenkernes in die Spiralen wuchs diese Zeitdauer sehr stark, selbst bis zum 20 fachen an (s. d. flgdn. Abschnitt).

137 Eine vollständige Berechnung des Verlaufes der inducirenden, wie der Inductionsströme ist für verschiedene Fälle von E. du Bois-Reymond[2]) unter den §. 120 angeführten, vereinfachenden Bedingungen angestellt worden. Wir wollen die Einheit der Widerstände so wählen, dass die Inductionsconstante $\varepsilon = 1$ zu setzen ist, und die Inductionswirkungen der Theile der Leitungen vernachlässigen, welche nicht in Form von Windungsreihen inducirend auf einander einwirken. Die Schliessungen und Oeffnungen der Stromkreise mögen in einer unmessbar kurzen Zeit vor sich gehen. In den Figuren bedeutet überall S die inducirende, Σ die Inductionsspirale, K die den primären Strom erregende Kette, a den Punkt, in welchem das Schliessen oder Oeffnen ihres Schliessungskreises stattfindet.

---

[1]) Guillemin, Compt. rend. 50, p. 1104. 1860*. — [2]) E. du Bois-Reymond, nach einer Originalmittheilung, auch Monatsbericht d. Berlin. Akad. 26. Juni 1862*. Nach Maxwell werden häufig die Potentiale der inducirenden und der Inductionsspirale auf sich selbst mit L und N, das Potential beider Spiralen aufeinander mit M bezeichnet. Letztere Bezeichnung ist nicht ganz bequem, da M gewöhnlich das Moment eines Magnetes bedeutet. Wir behalten die im Text gebrauchten Bezeichnungen überall bei.

Die elektromotorische Kraft der den inducirenden Strom erzeugenden Kette sei E, der Gesammtwiderstand ihres Schliessungskreises w, das Potential der inducirenden Spirale auf sich selbst P_1, der Gesammtwiderstand des secundären Inductionskreises w_σ, das Potential der Inductionsspirale auf sich selbst P_2, das Potential beider Spiralen auf einander $P_{1,2}$, die constante Intensität des Stromes in dem primären Kreise (nach dem Aufhören der etwaigen Inductionsströme) $I = E/w$, die Intensität des Stromes in demselben Kreise während der Dauer des beim Schliessen oder beim Oeffnen entstehenden Inductionsstromes in ihm I_a und I_e, die Intensität des Inductionsstromes in der secundären Spirale zu den entsprechenden Zeiten i_a und i_e.

1. Wir betrachten zuerst die Induction in einer Nebenrolle durch Oeffnen des primären Stromkreises, Fig. 44. Dieselbe

Fig. 44.

ist schon von Helmholtz berechnet worden[1]. Beim Oeffnen des primären Kreises verschwindet der inducirende Strom plötzlich; in dem Inductionskreise wird ein Strom inducirt, dessen Gesammtintensität gegeben ist durch die Gleichung:

$$\int_0^\infty i_e dt = \frac{IP_{1,2}}{w_\sigma} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Da der inducirende Kreis während des Verlaufes des Inductionsstromes geöffnet ist, treten Rückwirkungen des letzteren auf jenen Kreis nicht ein; wir haben also nur die durch die Aenderungen der Intensität des Inductionsstromes selbst in dem secundären Kreise bewirkte Induction zu beachten. Die hierdurch in jedem Augenblicke inducirte elektromotorische Kraft ist gegeben durch die Gleichung

$$i_e w_\sigma = - P_2 \frac{d i_e}{dt} \text{ oder } i_e = Ce^{-\frac{w_\sigma}{P_2} t} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Setzt man diesen Werth für i_e in Gleichung 1) ein, so erhält man

$$\frac{P_2}{w_\sigma} C = \frac{IP_{1,2}}{w_\sigma} = \frac{EP_{1,2}}{w \cdot w_\sigma}$$

$$i_e = \frac{EP_{1,2}}{w P_2} e^{-\frac{w_\sigma}{P_2} t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

[1] Helmholtz, Pogg. Ann. 83, p. 536, 1851*.

Die Intensität des Oeffnungsstromes ist also um so grösser, je grösser das Potential der Spiralen auf einander, je kleiner das Potential der inducirten Spirale auf sich selbst und ihr Widerstand ist.

Fig. 45.

Verzeichnen wir als Abscissen, Fig. 45, die Zeiten von Anfang der Oeffnung des primären Stromes, als Ordinaten die Intensitäten des inducirenden und inducirten Stromes, so geben in beifolgender Figur die Curven J_e und i_e den Verlauf der Intensitäten beider Ströme an. Die Intensität des inducirenden Stromes sinkt, wie wir schon erwähnt, plötzlich von I bis auf Null, die Intensität des Inductionsstromes steigt aber plötzlich bis zu $i_e = EP_{1,2}/wP_2$ an und sinkt dann allmählich auf Null hinab.

2. Induction in einer Nebenrolle durch Schliessen des primären Kreises. 138

Wächst beim Schliessen des primären Kreises in a, Figur 46, die Intensität I_a darin allmählich bis zu I an, so entsteht in demselben in jedem Augenblicke ein Extrastrom von der Intensität $-P_1/w . dI_a/dt$. Zugleich wird in der Inductionsspirale ein Strom inducirt, dessen Intensität durch $-P_{1,2}/w_\sigma . dI_a/dt$ dargestellt ist. Indem dieser seine Intensität ändert, inducirt er wiederum in der primären Spirale einen Strom von der Intensität $-P_{1,2}/w . di_a/dt$, in der Inductionsspirale selbst einen Strom von der Intensität $-P_2/w_\sigma . di_a/dt$. Die in den beiden Schliessungskreisen der inducirenden und Inductionsspirale erzeugten Ströme sind also bestimmt durch die zwei simultanen Differentialgleichungen:

Fig. 46.

$$I_a w = E - P_1 \frac{dI_a}{dt} - P_{1,2} \frac{di_a}{dt} \quad \ldots\ldots\ 1)$$

$$i_a w_\sigma = - P_{1,2} \frac{dI_a}{dt} - P_2 \frac{di_a}{dt} \quad \ldots\ldots\ 2)$$

Die Integration dieser Gleichungen giebt:

$$I_a = \frac{E}{2 w \varrho_a} \left\{ 2 \varrho_a + \varphi''_a e^{-\Theta'_a t} - \varphi'_a e^{-\Theta''_a t} \right\} \quad \ldots\ldots\ 3)$$

$$i_a = - \frac{E}{2 w \varrho_a} \left\{ e^{-\Theta'_a t} - e^{-\Theta''_a t} \right\} \text{[1]} \quad \ldots\ldots\ 4)$$

[1] Zur Ausführung der Integration eliminirt man aus 1) und 2) nach einander di_a/dt und dI_a/dt; von den erhaltenen Gleichungen wird die letzte

wo

$$\varrho_a = \sqrt{\frac{w_\sigma}{w} + \left(\frac{w_\sigma P_1 - w P_2}{2 w P_{1,2}}\right)^2} \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

$$\varphi'_a = -\frac{w_\sigma P_1 - w P_2}{2 w P_{1,2}} + \varrho_a, \quad \varphi''_a = -\frac{w_\sigma P_1 - w P_2}{2 w P_{1,2}} - \varrho_a \quad . \; . \quad 6)$$

$$\Theta'_a = \frac{w_\sigma P_1 + w P_2 - 2 w P_{1,2}\, \varrho_a}{2(P_1 P_2 - P_{1,2}^2)}, \quad \Theta''_a = \frac{w_\sigma P_1 + w P_2 + 2 w P_{1,2}\, \varrho_a}{2(P_1 P_2 - P_{1,2}^2)} \quad 7)$$

So lange der Nenner von Θ_a positiv ist, also $P_1 P_2 > P_{1,2}^2$, so lange sind Θ'_a und Θ''_a positiv, und da $\Theta'_a < \Theta''_a$ ist, i_a negativ. Die Richtung des Schliessungsinductionsstromes ist also entgegengesetzt der Richtung des inducirenden Stromes. Dies ist der allein vorkommende Fall. Würde $P_1 P_2 = P_{1,2}^2$, so würde $i_a = 0$; dies wäre aber nur möglich, wenn z. B. die Inductionsspirale und inducirende Spirale völlig zusammenfielen, wo dann $P_1 = P_2 = P_{1,2}$ wäre, was nicht geschehen kann. Ebenso wenig kann $P_{1,2}^2 > P_1 P_2$ werden; in welchem Falle der Inductionsstrom positiv, d. h. dem inducirenden gleichgerichtet würde. Bilden wir in dem einzig möglichen Falle ($P_1 P_2 > P_{1,2}^2$) den Werth

$$\frac{d i_a}{d t} = -\frac{E}{2 w \varrho_a}\left(-\Theta'_a e^{-\Theta'_a t} + \Theta''_a e^{-\Theta''_a t}\right),$$

so giebt das allmähliche Ansteigen und Abfallen der die Intensität i_a darstellenden Curve Fig. 46 den Verlauf desselben an. Für $t = 0$ ist $i_a = 0$ und $d i_a / dt = - E P_{1,2} / (P_1 P_2 - P_{1,2}^2)$, also negativ; ebenso bleibt es negativ bei kleinen Werthen von t, die negative Intensität i_a wächst, aber immer langsamer, da $d i_a / dt$ immer kleiner wird; die Intensität erreicht sodann ein Maximum, wenn dieser Werth gleich Null ist; sie fällt wieder allmählich ab; die die Intensität i_a darstellende Curve nähert sich asymptotisch der Abscissenaxe, wenn t noch grösser wird, da dann $d i_a / d t$ positiv ist. Die Betrachtung von $d^2 i_a / d t^2$ ergiebt, dass für $t = 0$ diese Curve gegen die Abscissenaxe concav ist. Zugleich ist $P_{1,2}\, d I_a / dt = - P_2 d i_a / d t$, so dass sich die Inductionen in der secundären Spirale durch den entstehenden Hauptstrom und Inductionsstrom für $t = 0$ gerade aufheben

---

mit einem constanten Factor φ multiplicirt und zur ersten addirt. Man setzt darauf $u = I_a + \varphi i_a$ und wählt φ so, dass in der neuen Gleichung der Coefficient von i gleich Null wird. Die Gleichung lässt sich dann integriren und ergiebt u in Form einer Exponentialgrösse; φ entwickelt sich aus einer quadratischen Gleichung, erhält also zwei Werthe φ' und φ'', und entsprechend erhält u zwei Werthe $u' = I_a + \varphi' i_a$ und $u'' = I_a + \varphi'' i_a$, deren jeder eine andere Integrationsconstante C_1 und C_{11} enthält. Aus der Bedingung für die Gesammtintensität des Inductionsstromes $\int_0^\infty i_a\, dt = -\frac{E P_{1,2}}{w w_\sigma}$ folgt dann $C_1 = C_{11} = E / w$. Bei Elimination von I_a und i_a aus den beiden Gleichungen für u ergeben sich die obigen Werthe 3) und 4) für I_a und i_a.

Während also der Oeffnungsinductionsstrom sogleich in seiner ganzen Stärke auftritt, erreicht der Schliessungsinductionsstrom nur langsam das Maximum seiner Intensität; alle Wirkungen daher, welche von dem schnellen Anwachsen der letzteren abhängen, treten bei dem Öffnungsinductionsstrom stärker auf, so namentlich die physiologischen Wirkungen u. s. f. (s. u.). — Je grösser unter sonst gleichen Umständen das Potential P_1 der inducirenden Spirale S auf sich selbst ist, je mehr Windungen sie hat und je enger dieselben an einander liegen, desto kleiner ist di_a/dt für $t = 0$ ist, desto langsamer steigt die Curve, welche die Intensität des Inductionsstromes darstellt, von Anfang an auf; desto schwächer ist z. B. seine physiologische Wirkung.

Der Werth der Stromstärke I_a des inducirenden Stromes setzt sich aus der Intensität E/w zusammen, zu welcher sich die durch Exponentialcurven darstellbaren Werthe $\frac{E}{2\,w\,\varrho_a}\varphi''_a e^{-\Theta'_a t}$ und $-\frac{E}{2\,w\,\varrho_a}\varphi'_a e^{-\Theta''_a t}$ hinzufügen, die mit zunehmender Zeit t immer kleiner werden. Für die Zeit $t = 0$ ist die Summe dieser letzteren Werthe gleich $-E/w$, also $I_a = 0$; für die Zeit $t = \infty$ ist jene Summe gleich Null, also $I_a = E/w$. Die Intensität I_a wird durch die Curve I_a, Fig. 46, dargestellt. Die Gesammtintensität, um welche in dieser Weise während des Anwachsens der Intensität des primären Stromes die Intensität E/w desselben vermindert wird, entspricht der Gleichung $\int\limits_0^\infty \left(I_a - \frac{E}{w}\right) dt = \frac{E P_1}{w^2}$; sie ist also ebenso gross, wie wenn die Stromänderung in der primären Spirale nur durch den unmittelbar in ihr erzeugten Anfangsextrastrom bedingt worden wäre. In der That muss die gesammte elektromotorische Kraft, welche beim Anwachsen der Intensität des inducirten Stromes in der secundären Spirale in ihr rückwärts inducirt wird, gleich und entgegengesetzt sein der elektromotorischen Kraft, welche beim Verschwinden des letzteren Stromes in ihr inducirt wird.

139 Sind die Widerstände der primären und secundären Schliessung einander gleich, also $w = w_\sigma$, und sind die auf einander einwirkenden Spiralen ebenfalls gleich, also $P_1 = P_2$, so wird $\varrho_a = 1$, $\varphi'_a = +1$, $\varphi''_a = -1$, $\Theta'_a = w/(P_1 + P_{1,2})$, $\Theta''_a = w/(P_1 - P_{1,2})$. Dann ergiebt sich [wie sich übrigens auch leicht unmittelbar aus den Gleichungen 1) und 2) entwickeln lässt][1]:

$$I_a = \frac{E}{2w}\left\{2 - e^{-\frac{w}{P_1 + P_{1,2}}t} - e^{-\frac{w}{P_1 - P_{1,2}}t}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

$$i_a = -\frac{E}{2w}\left\{e^{-\frac{w}{P_1 + P_{1,2}}t} - e^{-\frac{w}{P_1 - P_{1,2}}t}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

[1]) Aehnliche Gleichungen sind auch schon von Koosen (Pogg. Ann. 91, p. 446, 1854*) abgeleitet worden.

Mit wachsendem Potential P_1 nimmt also für gleiche Zeiten t die Intensität i_a des inducirten Stromes ab. Sie erreicht zu einer Zeit t_m ein Maximum, für welche $di_a/dt = 0$ ist. Dann ist

$$t_m = \frac{P_1^2 - P_{1,2}^2}{2\,w\,P_{1,2}} \log \frac{P_1 + P_{1,2}}{P_1 - P_{1,2}}.$$

Die Zeit t_m nimmt ab mit wachsenden Werthen von $P_{1,2}$. Ist $P_{1,2}$ gleich Null, so ist sie P_1/w; ist $P_{1,2}$ nahezu gleich P_1, so ist sie annähernd gleich Null; so dass der Gang der Intensität des inducirten Stromes mit wachsendem $P_{1,2}$ durch die Curven 1 und 2, Fig. 47, dargestellt wird.

Wäre auch $P_{1,2}$ nur wenig kleiner als $P_1 = P_2$, so könnte man das letzte Glied in den Gleichungen 8) und 9) nahezu gegen die ersten vernachlässigen. Dann wäre Anfangs $I_a = 0$ und $i_a = 0$; sehr kurze Zeit nachher aber schon $I_a = E/2\,w$ und $i_a = -E/2\,w$. Bei wachsenden Zeiten würde die Intensität des primären Stromes in gleicher Weise ansteigen, wie sich die Intensität des inducirten Stromes allmählich vermindert. Da die Intensität des Oeffnungsinductionsstromes unter obiger Annahme gleich am Anfange für $t = 0$ nahezu gleich $i_e = E/w$ ist, also

Fig. 47.

Fig. 48.

die doppelte von der des Schliessungsinductionsstromes, seine Gesammtintensität aber gleich der des letzteren ist, so fällt also auch hier die Intensität des Oeffnungsstromes viel schneller ab, als die des Schliessungsstromes. Der Verlauf dieser Ströme ist in der Fig. 48 dargestellt. Die Flächenräume Ω und Ω_1, welche die Gesammtintensität des Oeffnungs- und Schliessungsextrastromes bezeichnen, sind einander gleich. — Ist $P_1 = P_{1,2}$, so ist das letzte Glied der Gleichungen 8) und 9) für $t = 0$ unbestimmt; dieser Fall ist nicht möglich.

140 3. **Induction durch Oeffnen einer Nebenleitung zur primären Rolle, Fig. 49.** Die Widerstände der primären Rolle, der Nebenleitung und des die Kette enthaltenden Zweiges des primären Schliessungskreises seien w_s, w_n und w_k. Setzen wir dann

$$w_n w_k + w_k w_s + w_s w_n = N, \quad \frac{w_k\, w_s}{(w_k + w_s)\,N} = \Xi,$$

so erhalten wir zunächst dieselben Differentialgleichungen, wie in dem ad 2 betrachteten Falle, nur tritt in ihnen, sowie in φ_a und ϱ_a an Stelle

Fig. 49.

des Werthes w der Werth $w_k + w_s$. Nach Bestimmung der Integrationsconstanten [1]) folgt:

$$I_a = \frac{E}{2(w_k + w_s)\varrho_a}\left\{2\varrho_a + \frac{w_k w_s}{N}\left(\varphi_a'' e^{-\Theta_a' t} - \varphi_a' e^{-\Theta_a'' t}\right)\right\}$$

$$i_a = -\frac{E\Xi}{2\varrho_a}\left\{e^{-\Theta_a' t} - e^{-\Theta_a'' t}\right\}.$$

4. **Induction durch Schliessen einer Nebenleitung zur primären Rolle.** Wiederum ändern sich nur die Constanten in den Differentialgleichungen. Dieselben werden **141**

$$i_e w_\sigma = -P_{1,2}\frac{dI_e}{dt} - P_2\frac{di_e}{dt};$$

$$I_e N = E w_n - (w_k + w_n) P_1 \frac{dI_e}{dt} - (w_k + w_n) P_{1,2}\frac{di_e}{dt};$$

woraus folgt:

$$I_e = \frac{E}{2N\varrho_e}\left\{2 w_n \varrho_e + \frac{w_k w_s}{w_k + w_s}\left(\varphi_e' e^{-\Theta_e'' t} - \varphi_e'' e^{-\Theta_e' t}\right)\right\}$$

$$i_e = \frac{E\Xi}{2\varrho_e}\left\{e^{-\Theta_e' t} - e^{-\Theta_e'' t}\right\},$$

wo φ_e' und φ_e'' resp. gleich sind

$$-\frac{w_\sigma(w_k + w_n)P_1 - NP_2}{2NP_{1,2}} \pm \sqrt{\frac{w_\sigma(w_k + w_n)}{N} + \left(\frac{w_\sigma(w_k + w_n)P_1 - NP_2}{2NP_{1,2}}\right)^2},$$

ϱ_e die Grösse unter dem Wurzelzeichen im Ausdruck von φ_e ist, und Θ_e' und Θ_e'' gleich $\dfrac{NP_2 + w_\sigma(w_k + w_n)P_1 \mp 2NP_{1,2}\varrho_e}{2(w_k + w_n)(P_1 P_2 - P_{1,2}^2)}$ sind [2]).

---

[1]) Dieselben ergeben sich aus den Formeln $I_a = E w_n / N$ für $t = 0$, und $\int_0^\infty i_a\, dt = -2 E Q \Xi / w_\sigma$; beide werden $C_I = C_{II} = E\Xi$.

[2]) Die Integrationsconstanten sind $C_I = C_{II} = -E\Xi$. Sie folgen aus den Formeln $I_e = E/(w_k + w_s)$ für $t = 0$ und $\int_0^\infty i_e\, dt = E P_{1,2}\, \Xi / w_\sigma$.

Die Formeln für die Intensitäten i_e und i_a der beim Schliessen und Oeffnen in der Nebenrolle inducirten Ströme sind, abgesehen von den Constanten und dem Vorzeichen, einander gleich; beide Ströme haben also einen ganz ähnlichen Verlauf. Sie unterscheiden sich dadurch von den Strömen, welche in der Nebenrolle beim Schliessen und Oeffnen einer unverzweigten Hauptschliessung inducirt werden. Während also z. B. die Curven, Fig. 50 I, die bei wiederholtem Oeffnen und Schliessen im letzteren Falle inducirten Ströme darstellen, verlaufen dieselben bei Anwesenheit der Nebenleitung wie in Fig. 50 II. Dieser Unterschied rührt daher, dass sich in einer unverzweigten Hauptschliessung nicht beim Oeffnen, sondern allein beim Schliessen die Extraströme, sowie die rückwärts durch die Inductionsströme der Nebenrolle in ihr inducirten Ströme entwickeln können, während dies in einer verzweigten Hauptschliessung sowohl beim Schliessen, als auch beim Oeffnen der Nebenleitung eintreten kann. Dabei steigt im letzteren Falle der Inductionsstrom i_a beim Oeffnen der Nebenleitung steiler an, als der beim Schliessen derselben inducirte Strom i_e.

Fig. 50.

Wollte man den Verlauf der Intensitäten i_a und i_e der Schliessungs- und Oeffnungsinductionsströme bei Anwesenheit der Nebenschliessung ganz gleich herstellen, so müssten die Werthe ϱ, Θ', Θ'', durch welche sich i_a und i_e unterscheiden, einander gleich werden, d. h. es müsste

$$\frac{w_k + w_n}{N} = \frac{1}{w_k + w_s} \text{ oder } w_s + w_k = w_s + w_k \cdot \frac{w_n}{w_k + w_n}$$

sein. Um letztere Gleichheit möglichst herzustellen, muss entweder $w_k = 0$ sein, wo bei Veränderung der Nebenschliessung kein Inductionsstrom entstände und $\Xi = 0$ wäre, oder es müssten w_k und w_n gegen w_s gleichzeitig verschwindend klein werden, oder endlich w_n gegen w_k, w_k gegen w_s sehr klein sein. Im ersteren Falle wird der Factor Ξ, welchen die Ausdrücke i_a und i_e enthalten, $\Xi = w_k / w_s (w_k + w_n)$, im zweiten $\Xi = 1 / w_s$. Da im letzteren Falle die Intensität der Inductionsströme bedeutender ist, wird man die demselben zu Grunde liegende Anordnung bei der experimentellen Ausführung des Verfahrens am zweckmässigsten benutzen.

Die Gleichheit der inducirenden und Inductionsrolle, d. h. die Gleichheit von $P_1 = P_2$ würde in diesem Falle nur dann eine Vereinfachung der Betrachtung ermöglichen, wenn zugleich $w_\sigma (w_k + w_n) = N$ und $w_\sigma = w_k + w_s$ wäre; eine Bedingung, die unmittelbar auf die eben betrachtete Gleichheit des Verlaufes der Oeffnungs- und Schliessungsinductionsströme führt.

142 Die Intensitäten I_a und I_e der primären Ströme sind nach dauernder Oeffnung oder Schliessung der Nebenleitung resp.

$$I_a^\infty = E/(w_k + w_\sigma) \text{ und } I_e^\infty = Ew_n/N.$$

Diese Intensitäten sind während der Dauer der Extraströme und der rückwärts in der primären Leitung inducirten Ströme vermehrt und vermindert um die Werthe:

$$\int_0^\infty \left(I_a - \frac{E}{w_k + w_s}\right) dt = - EP_1 \Xi \frac{1}{w_k + w_s}$$

und

$$\int_0^\infty \left(I_e - \frac{Ew_n}{N}\right) dt = + EP_1 \Xi \frac{1}{w_s + \frac{w_k}{1 + \frac{w_k}{w_n}}}.$$

Von diesen Werthen ist absolut genommen der erstere der kleinere, so dass also der Strom bei der Schliessung schneller zu seinem Maximum ansteigt, als derselbe beim Oeffnen sinkt (wie in Fig. 51). Die Intensität des Extrastromes ist aber in beiden Fällen unmittelbar nach dem Oeffnen oder Schliessen der Nebenleitung dieselbe, nämlich:

$$E\Xi = \frac{E}{w_k + w_s} - \frac{Ew_n}{N}.$$

Fig. 51.

Nur in dem Falle, in welchem der Oeffnungs- und der Schliessungsinductionsstrom in der secundären Spirale gleichen Verlauf haben, gilt dies auch von dem Ansteigen und Sinken des primären Stromes in der inducirenden Spirale. Dies kann nur eintreten, wenn beim Schliessen und Oeffnen der Nebenleitung der Widerstand in den Schliessungskreisen der primären Rolle der gleiche ist, d. h. wiederum nur, wenn entweder $w_k = 0$ ist oder w_k gegen w_s, w_n gegen w_s und w_k verschwindet.

143 Befindet sich in der inducirenden Spirale noch ein Eisenkern und ist die Intensität des inducirenden Stromes so klein, dass das magnetische Moment des Eisenkerns M der Stromintensität I_a oder I_e des inducirenden Stromes proportional, also $M = cI$ gesetzt werden kann, ist ferner das Potential des Eisenkerns auf die inducirende Spirale P_1', auf die Inductionsspirale $P_{1,2}'$, so sind in allen Formeln an Stelle der Werthe P und Q die Werthe $P_1 + cP_1'$ und $P_{1,2} + cP_{1,2}'$ zu setzen. Wir nehmen dabei vorläufig an, dass die Aenderungen des Magnetismus des

Eisenkerns mit gleicher Schnelligkeit vor sich gehen, wie die Aenderungen der Stromintensität in der primären Spirale[1]).

144 Die theoretisch abgeleiteten Resultate werden durch die Versuche im Allgemeinen bestätigt. Indess werden sie meist durch secundäre Umstände mehr oder weniger abgeändert. Einmal treten Ströme höherer Ordnung, als die in Rechnung gezogenen, auf; sodann wird ein inducirender Kreis nie wirklich momentan geschlossen und geöffnet; bei der Oeffnung verlängert auch der durch den Oeffnungsextrastrom verstärkte Funken die Dauer des Oeffnens, so dass der Inductionsstrom in der secundären Spirale gleichfalls nicht plötzlich, sondern allmählich inducirt wird.

Diese Verhältnisse zeigen sich u. A. bei den Versuchen von Lemström[2]), den Verlauf eines Inductionsstromes in einer Inductionsspirale zu bestimmen. Die inducirte und die inducirende Spirale waren zusammen aus zwei parallelen, in je 79 Windungen in zwei Lagen um eine Rolle gewundenen Kupferdrähten von 0,5 mm Durchmesser gebildet. Ihr äusserer Durchmesser betrug 134,3 mm. Die Verbindungen geschahen vermittelst der Wippe von Helmholtz (§. 126). Um die Intensität des Schliessungsinductionsstromes zu messen, wurde die inducirende Spirale unter Einschaltung einer Säule durch den Hebel ab, die inducirte Spirale durch den Hebel B, je nach der Stellung der Kuppen m_r und m_l eine bestimmte Zeit nach dieser Schliessung unter Einschaltung einer Spiegelbussole geschlossen. Zur Messung der Oeffnungsinduction wurde der inducirende Strom durch den Hebel A, darauf der inducirte durch den Hebel B geschlossen. Zur Messung der Zeit zwischen diesen Vorgängen wurde im ersten Fall ein constanter Strom direct durch ab und B und die Bussole geleitet, so dass er beim Hinunterfallen des Hebels ab geschlossen, beim Heben von B geöffnet wurde und eine ebenso lange Zeit durch die Bussole lief, wie zwischen dem Schliessen des inducirenden und Oeffnen des inducirten Stromes verlief.

Bei den Versuchen über den Oeffnungsstrom wurde, um die Zeit der Transmission des Stromes von Hebel ab auf A zu eliminiren, der zeitmessende Strom durch Hebel ab und B mit dem Galvanometer verbunden und eine Brückenleitung von verschwindendem Widerstand

---

[1]) Weitere Berechnungen von Brillouin. Integration der bei der Betrachtung der Inductionsströme in derivirten Kreisen auftretenden Differentialgleichungen. Thèse de Doctorat Nr. 446, 1880*; Ueber die Theilung der elektrischen Ströme; J. de Phys. **10**, p. 24, 1881*; Beibl. **5**, p. 370*. Heaviside, Berechnung des Verhältnisses der Widerstände eines Elektromagneten, wenn die Stromintensität nach dem Gesetz einer Sinuscurve variirt, um das Maximum der Wirkung zu erhalten. Phil. Mag. [5], **6**, p. 177, 1878; auch J. Telegr. Engineers **7**, p. 303, 1875*; Beibl. **3**, p. 114*. — [2]) Lemström, Recherches expérimentales sur la marche d'intensité des courants d'induction voltaique. Stockholm 1870* (Mém. présenté à l'acad. de Suède. Mai 12. 1869); Auszug in Pogg. Ann. **147**, p. 354, 1872*.

zwischen ab und A eingefügt, so dass nur ein ganz unmerklicher Antheil des Stromes durch die Bussole des Galvanometers floss. Die Brückenleitung wurde geöffnet, sobald sich Hebel A hob, so dass dann der zeitmessende Strom zwischen dem Heben von A und von B durch das Galvanometer die gleiche Zeit hindurchströmte, welche auch zwischen dem Oeffnen des inducirenden und inducirten Stromes verging. Da hierbei der in den Windungen des Galvanometers erzeugte Extrastrom den zeitmessenden Strom um ein Bestimmtes schwächte, wurde erst (I) der Strom ohne Brückenleitung durch das Galvanometer geleitet; sodann wurde eine Brücke von bekanntem Widerstand vor dem Galvanometer in seine Schliessung eingeschaltet und der Stromkreis vor der Brücke in dem die Säule enthaltenden Zweige geschlossen, einmal aber (II) vor der Brücke, sodann hinter derselben in dem das Galvanometer enthaltenden Zweige (III) unterbrochen. Sind R, r und r_1 die Widerstände der drei die Säule, das Galvanometer und die Brücke enthaltenden Zweige, ist E die elektromotorische Kraft, t die Zeit der Schliessung, sind i_{I} und i_{II} die Intensitäten des Extrastromes ohne (I) und mit Einschaltung der Brücke (II), so ist die Intensität in den drei Fällen annähernd:

$$I_{I} = \frac{E}{R+r}t - i_{I}; \; I_{II} = \frac{Er_{I}}{Rr + rr_{I} + r_{I}R} - i_{II}; \; I_{III} = \frac{Er_{I}}{Rr + rr_{I} + r_{I}R},$$

vorausgesetzt, dass die Extraströme sich vollständig entwickeln können, was nur annähernd richtig ist.

Aus I_{III} und I_{II} folgt i_{II}. Nun ist ferner, wenn n die Zahl der Windungen der Spirale ist:

$$i_{I} = \frac{En^2}{(R+r)^2}; \qquad i_{II} = \frac{En^2 r_{I}}{(Rr + rr_{I} + r_{I}R)\,(r + r_{I})},$$

woraus E eliminirt und i_{I} durch i_{II} ausgedrückt werden kann. Dann folgt aus I_{I} der Werth t.

Aus diesen Versuchen ergaben sich folgende Resultate:

Der Schliessungsstrom erreicht seine Maximalintensität sehr schnell, schon in 0,00006 Secunden; darauf sinkt seine Intensität erst sehr schnell, dann langsam. Mit wachsendem Widerstande des inducirenden Kreises, bis der Widerstand ausserhalb der Kette etwa der Doppelte von dem Widerstande in derselben ist, wächst, in Folge der Veränderung des Extrastromes in dem primären Kreise, die Maximalintensität desselben; bei noch grösserem Widerstand sinkt sie wieder. Zugleich verkürzt sich aus demselben Grunde nahezu proportional mit wachsendem Widerstande die Zeit zwischen dem Beginn der Induction und dem Zeitpunkt der Maximalintensität. Dabei ist die Gesammtintensität des Schliessungsinductionsstromes in den ersten Momenten viel (bis zu 4 mal) grösser, als die des inducirenden Stromes in derselben Zeit; wiederum durch die Wirkung des Extrastromes auf letzteren.

Der Oeffnungsinductionsstrom verläuft, sicherlich in Folge der Funkenbildung und langsameren Oeffnung, nach Lemström, nicht in kürzerer Zeit, als der Schliessungsstrom; auch ändern Widerstände, welche in den primären Kreis eingeschaltet werden, kaum die Maximalintensität des Inductionsstromes; sie vergrössern den Abstand des Zeitpunktes der letzteren vom Beginn der Induction. Jedenfalls gleicht sich also ein grosser Theil des Oeffnungsextrastromes in der primären Spirale noch durch den Oeffnungsfunken aus.

Bei Einlegen eines Eisenkernes verzögert sich das Inductionsphänomen bedeutend, wenn dadurch auch die Intensität des Oeffnungsstromes in den ersten Momenten seiner Dauer vermehrt wird.

Im Allgemeinen ist hierbei nicht die gesammte Dauer der Inductionsströme um so kleiner, je grösser ihre Maximalintensität ist, sondern sie verlaufen dann nur eine längere Zeit mit einer verhältnissmässig verminderten Intensität, so dass doch die gesammte bewegte Elektricitätsmenge dieselbe ist.

145 Bazzi und Corbianchi (l. c. §. 129) haben auch diese Verhältnisse betrachtet. In einem Zimmer waren zwei grosse rechteckige und überall dicht neben einander liegende Drahtleitungen von je etwa 30 m Länge aufgespannt. Durch die eine Leitung wurde der durch Einschaltung von Drähten constant erhaltene Strom von 4 Bunsen'schen Elementen geleitet, die zweite war mit einem Spiegelgalvanometer verbunden. In letztere Leitung war ein Silberdraht oder auch eine Drahtspirale eingefügt. Die Oeffnungen und Schliessungen geschahen mittelst des Felici'schen Interruptors (§. 128), dessen Rotation durch den Fall eines Pendels bewirkt wurde, welches zugleich eine zeitaufschreibende Stimmgabel zu einem bestimmten Moment in Bewegung setzte und nachher anhielt.

Die die unterbrechenden Theile des Interruptors tragenden Mikrometerschrauben wurden erst so gestellt, dass beide den Strom gleichzeitig öffneten, um die der Zeit Null entsprechende Lage zu erhalten; nachher wurden sie gedreht und aus ihrer Stellung das Zeitintervall bestimmt.

Bei den ersten Versuchen waren beide Kreise geschlossen, darauf wurde erst der inducirende, dann der inducirte Kreis geöffnet. So wurden die Inductionen in je $^1/_{1500}$ Secunden Zeitintervall gemessen. Die am Galvanometer beobachteten Ablenkungen I entsprachen nicht ganz der theoretischen Berechnung nach der Formel

$$I = a\,(1 - 10^{-bt});$$

die Abweichungen erklären sich aber völlig, wenn man eine kleine Dauer des Oeffnungsfunkens annimmt, da während seines ganzen Verlaufs die inducirte elektromotorische Kraft vermehrt wird, während nach dem Ablauf desselben nur die Induction des inducirten Kreises auf sich selbst wirkt. Bei den analogen Versuchen mit einem Ruhmkorff'schen In-

ductorium von 30 cm Länge und dem Strom eines Daniell'schen Elementes stimmten die Versuche vollkommen mit der Theorie. Dasselbe geschah für die Schliessungsinduction bei Anwendung eines grösseren Inductoriums von Ruhmkorff. Die Intensitäten entsprachen der Formel $I = a - b(c\,10^{-\alpha t}) - d\,10^{-\beta t})$, und bei einem kleineren Inductorium der Formel $I = b\,(1 - 10^{-\alpha t})$.

146 Eine Bestätigung der Inductionsgesetze ist auch durch eine Reihe von Versuchen von v. Ettingshausen [1]) geliefert worden.

Eine Drahtrolle wird bifilar mit ihrer Axe in äquatorialer Lage zwischen den Polen eines Elektromagnetes aufgehängt und mit einem Spiegelgalvanometer mit stark gedämpftem Magnet verbunden. Beim Schwingen der Rolle geräth der Magnet ebenfalls durch die Inductionsströme in Schwingungen, wobei eventuell durch Aenderung der Schwingungsdauer der Rolle der Durchgang derselben und des Magnetes durch die Nulllage zur Coincidenz gebracht werden kann. Auch kann von aussen durch einen Endinductor ein Strom durch beide Apparate geleitet resp. ein Widerstand in ihren Kreis eingefügt werden. Die Beobachtungsresultate stimmen mit den aus den bekannten Principien abgeleiteten Berechnungen.

147 Das wichtigste Hilfsmittel zum Studium der in dieser oder ähnlicher Weise hervorgerufenen „elektrischen Schwingungen" ist das Elektrodynamometer [2]). Werden durch die feste und die bewegliche Rolle desselben zwei verschiedene Schwingungen (von gleicher Schwingungsdauer) geleitet, so hängt die Ablenkung der beweglichen Rolle nicht allein von den Amplituden der beiden Wechselströme, sondern auch von ihrem Phasenunterschiede ab. Sind die beiden Schwingungen durch die Gleichungen:

$$i_1 = a_1 \cos \frac{\pi t}{T}, \quad i_2 = a_2 \cos \left(\frac{\pi t}{T} - \varepsilon\right)$$

ausgedrückt, so ist das Drehungsmoment der beweglichen Rolle proportional mit:

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_1 i_2\, dt = \frac{1}{2}\, a_1 a_2 \cos \varepsilon.$$

Diese bemerkenswerthe Eigenschaft des Elektrodynamometers hat Oberbeck bei einer Reihe von Untersuchungen [3]) über elektrische Schwingungen verwerthet. Bei denselben wurden die beiden in Betracht

---

[1]) v. Ettingshausen, Wien. Ber. 79 [2], Jan. 1879*; Beibl. 3, p. 522*. — [2]) §. 147 bis 149 nach einer gefälligen Originalmittheilung des Herrn Oberbeck. — [3]) Sitzungsber. der Berl. Akademie 1882, p. 125 und 1065, 1883, p. 975*; Wied. Ann. 17, p. 816, 1040, 19, 213, 625*; Compt. rend. 96, p. 1498*; Elektrotechn. Zeitschr. 1883, p. 154*.

kommenden Wechselströme (von gleicher Schwingungsdauer) — je nach den Umständen — in verschiedener Weise erregt, und zwar wurden besonders die folgenden drei Methoden angewandt:

1) Die beiden Wechselströme werden durch einen besonders hierzu eingerichteten Inductionsapparat hervorgebracht, welcher gestattet, denselben beliebige Phasenunterschiede zu ertheilen.

2) Die von einer periodischen Stromquelle ausgehenden Schwingungen verbreiten sich durch ein verzweigtes Leitersystem. Die Ströme der einzelnen Zweige haben im Allgemeinen verschiedene Amplituden und Phasen bei gleicher Schwingungsdauer.

3) Elektrische Schwingungen eines Stromkreises wirken inducirend auf einen zweiten Stromkreis. Inducirende und inducirte Ströme haben bei gleicher Schwingungsdauer ebenfalls verschiedenene Phasen und Amplituden.

148 Der bei der ersten Methode benutzte Apparat, Fig. 52, bestand aus einem Sinusinductor, dessen Multiplicator durch zwei gegen einander drehbare Rollen ersetzt war. Bilden die Windungsebenen derselben einen Winkel η, so hängt der Phasenunterschied der beiden durch denselben rotirenden Magnet erregten Ströme in leicht zu berechnender Weise von η ab. Der Ausdruck für die Ablenkung der beweglichen Rolle wird besonders einfach, wenn: $\eta = \pi/2$, also wenn die Rollen senkrecht zu einander stehen. Diese Stellung kann benutzt werden, um die Inductionscoefficienten der beiden Kreise zu bestimmen oder mit eingeschalteten Rollen von bekanntem Inductionspotential zu vergleichen.

Fig. 52.

Ferner kann durch geeignete Anordnung der beiden Stromkreise (Einschaltung passender Widerstände) bewirkt werden, dass keine Ablenkung erfolgt. Jede Phasenverschiebung einer der beiden Schwingungen giebt sich dann durch einen Ausschlag am Elektrodynamometer zu erkennen. Solche Phasenänderungen werden hervorgebracht:

a) durch Veränderung des Widerstandes des einen Stromkreises,

b) durch Veränderung der Selbstinduction, also auch

c) durch Einführung von Eisenkernen in eine Magnetisirungsspirale des Stromkreises,

d) durch Einschaltung einer polarisirbaren Flüssigkeitszelle.

Den letzteren Umstand benutzte Oberbeck, um die Polarisationserscheinungen zu untersuchen, welche durch schnell wechselnde Ströme hervorgebracht werden. Die bisherigen Versuche beziehen sich hauptsächlich auf Elektroden verschiedener Metalle (Kupfer, Silber, Gold, Zinn, Platin, Palladium, Nickel, Aluminium) in concentrirter Kochsalzlösung. Legt man hierbei die von Kohlrausch gemachten Voraussetzungen zu Grunde, nach welchen sich die polarisirten Metallplatten wie zwei Condensatoren von constanter Capacität verhalten, so kann man diese Capacitäten berechnen. Die angestellten Versuche zeigen aber, dass die Kohlrausch'sche Hypothese nur bei sehr kleiner Dichtigkeit der ausgeschiedenen Gase, also gewissermaassen als Grenzfall, richtig zu sein scheint, und dass die Capacitäten complicirtere Functionen der Stromdichtigkeit sind.

149 Die zweite Methode führte zunächst auf die Frage nach den Gesetzen der Verbreitung elektrischer Schwingungen in verzweigten Leitersystemen. Mit Berücksichtigung der Selbstinduction der einzelnen Zweige und unter der Voraussetzung, dass in dem Systeme auch Condensatoren sich befinden, deren Belegungen in beliebiger Weise mit den einzelnen Verzweigungspunkten verbunden sein können, hat Oberbeck die allgemeinen Gleichungen entwickelt und auf den experimentell wichtigen Fall der Stromverzweigung des Wheatstone'schen Brückenvierecks angewandt. Von besonderem Interesse ist dabei die Berechnung des Phasenunterschieds der beiden Diagonalzweige, von denen der eine die periodische Stromquelle mit der festen Rolle des Elektrodynamometers, der andere die bewegliche Rolle enthält. Für den Fall, dass dieser Phasenunterschied $\pi/2$ beträgt, ergeben sich bemerkenswerthe Bedingungsgleichungen zwischen den in Betracht kommenden Grössen (Widerständen, Inductionscoefficienten, Capacitäten der einzelnen Zweige) und der Schwingungszahl der Wechselströme.

Bezeichnet man die Widerstände der vier Seitenzweige mit w_1, w_2, w_3, w_4, den des Brückenzweiges mit w und setzt man:

$$w' = \frac{w(w_3 + w_4)}{w_3 + w_4 + w},$$

so erhält man in dem einfachsten Falle, wo keine Condensatoren vorhanden sind und nur die Selbstinduction in Zweig 1 berücksichtigt zu werden braucht:

$$\pi^2 n^2 p_1^2 = \left(w_2 \frac{w^4}{w_3} - w_1\right)(w_1 + w_2 + w^1).$$

Hierin ist n die Schwingungszahl der Wechselströme, p_1 der Inductionscoefficient des Zweiges 1, welcher also durch eine Zeitmessung und durch Widerstandsbestimmungen nach absolutem Maass gemessen werden kann.

150 Auch die Capacitäten von Condensatoren kann man in ähnlicher Weise messen. Bei anderen Anordnungen erhält man Methoden, Inductionscoefficienten und Capacitäten zu vergleichen. Besonders einfach gestaltet sich die Ausführung der Versuche im letzten Falle, wobei man als Stromquelle mit Vortheil ein gewöhnliches Inductorium benutzen kann. Oberbeck hat nach dieser Methode Condensatoren verschiedener Art verglichen und gefunden, dass die vielfach benutzten Condensatoren mit einer isolirenden Schicht von Paraffinpapier sehr erheblich durch die Temperatur beeinflusst werden.

151 Die Methode der Wheatstone'schen Brücke konnte ferner zur Bestimmung der magnetischen Momente benutzt werden, welche durch Wechselströme in Eisen- und Stahlstäben inducirt werden. Dabei zeigte sich, dass in vielen Fällen die Induction von Magnetismus in den Eisenmassen eine gewisse Verzögerung erfährt, welche zum Theil durch die Inductionsströme in der Eisenmasse selbst, zum Theil durch moleculare Vorgänge in derselben erklärt werden kann. Die hierdurch bewirkte Phasenverzögerung der magnetischen Momente im Vergleich zu den magnetisirenden Kräften konnte nach der dritten Methode gemessen werden. Dabei ergab sich, dass Bündel von dünnen Drähten keine Phasenverzögerung zeigten, dass dieselbe aber mit wachsendem Durchmesser der Drähte zunimmt. Daraus dürfte zu schliessen sein, dass es sich bei dieser Erscheinung hauptsächlich um die Mitwirkung der Inductionsströme der Eisenmasse handelt.

152 Der zeitliche Verlauf der inducirten Ströme höherer Ordnung hat Buff[1]) studirt, indem er durch einen Analysator (Bd. I, p. 114, Fig. 32) den Schliessungskreis der ersten inducirenden Spirale (I), Fig. 53, und

Fig. 53.

II IV I III

den ersten Inductionskreis der Spiralen (II) und (III) in der Weise abwechselnd öffnete und schloss, dass durch letzteren nur die Schliessungs- oder nur die Oeffnungsinductionsströme circuliren konnten. Die Bandspiralen (I), (II), (III) bestanden aus je 28 Windungen eines Kupferstreifens von 22 mm Breite und 1 mm Dicke, die eine cylindrische Höh-

[1]) Buff, Pogg. Ann. **134**, p. 481, 1868*.

lung von 8 cm Weite umschlossen. Dabei war die tertiäre Spirale (IV) durch zwei den Spiralen (I), (II), (III) gleiche Spiralen ersetzt, welche auf beiden Seiten gegen die Spirale (III) gegengelegt waren. Durch die Spirale (I) wurde der Strom eines Bunsen'schen Elementes geleitet.

Wurde in den Schliessungskreis der Spirale (IV) ein Galvanometer und ein Wasserzersetzungsapparat mit dünnen Platinelektroden (Thl. II, §. 758) eingefügt, und circulirte in den secundären Spiralen (II) und (III) nur der Oeffnungsinductionsstrom, so zeigte die Galvanometernadel nicht mehr die doppelsinnige Ablenkung, wie ohne Einschaltung des Wasserzersetzungsapparates, sondern neben der Wasserzersetzung trat eine Ablenkung auf, die einem dem primären Strom oder auch dem secundären Oeffnungsstrom entgegengerichteten tertiären Inductionsstrom, also dem Ansteigen des secundären Stromes entsprach. Eisenkerne in den Spiralen steigerten die Wasserzersetzung und Ablenkung der Galvanometernadel. Durch die secundären Schliessungsinductionsströme konnten diese Wirkungen nicht erhalten werden.

Bei der primären Oeffnungsinduction waren die Wirkungen bei gleicher Unterbrechungszahl etwa doppelt so gross, als bei der Schliessungsinduction. Wenn auch die Summe der bei beiden Inductionswirkungen in der secundären Leitung inducirten elektromotorischen Kräfte gleich ist, so vertheilen sie sich doch bei der Schliessung auf längere Zeit; die Gesammtänderung der Stromintensität in der secundären Leitung ist also geringer und somit die dieser proportionale inducirte elektromotorische Kraft der tertiären Ströme.

Da bei Anwesenheit von geschlossenen Spiralen neben der Hauptleitung die in ihnen bei der Schliessung inducirten Ströme bei ihrem Entstehen rückwärts in der Hauptleitung Ströme induciren, welche dem Strome in letzterer gleichgerichtet, bei ihrem Vergehen solche, die ihm entgegengerichtet sind, so muss der Hauptstrom anfangs schneller, dann langsamer ansteigen, als ohne jene Rollen. Daher wächst der secundäre Schliessungsstrom schneller und verschwindet langsamer, als ohne die Nebenspiralen, und so wird der tertiäre, dem Ansteigen des Schliessungsstromes entsprechende, dem Hauptstrom gleichgerichtete Inductionsstrom verstärkt, der entgegengesetzte geschwächt. Dazu kommt noch die Induction der tertiären Ströme auf die secundäre Spirale, die in gleichem Sinne wirkt, wie die Induction in den Nebenspiralen, welche aber bei wachsendem Widerstande des tertiären Kreises abnimmt.

Bringt man bei jenen Versuchen über und unter die Spiralen (I) und (II) noch zwei andere gleiche, in sich geschlossene Spiralen, und steckt durch alle einen Eisenkern, so verzögern die in letzteren inducirten Ströme durch Rückwirkung auf die Spiralen (I) und (II) die Entwickelung der Oeffnungsinductionsströme in der Spirale (II), und die tertiären Ströme verlaufen langsamer, so dass bei gleicher Gesammtsumme der inducirten elektromotorischen Kräfte ihre in jedem Zeittheil inducirte elektromotorische Kraft immer mehr sinkt. Die Gesammt-

zeiten der Induction t und t_1 werden dann einander mehr und mehr gleich und die Ablenkung des Galvanometers sinkt.

Bei Anwendung von acht Bunsen'schen Elementen, einer Spirale von 600 Windungen von 1 mm dickem Kupferdraht, welche ein Eisendrahtbündel von 4 cm Durchmesser enthielt, an Stelle der Spirale (IV) und Füllung der übrigen Spiralen mit Eisendrahtbündeln konnte analog gezeigt werden, dass nun die überwiegende Wirkung den beim Entstehen des secundären Schliessungsstromes, dem Hauptstrom gleichgerichteten, tertiären Strömen zukommt, letztere also schneller verlaufen; indess ist doch die galvanometrische Wirkung viel geringer, als bei den bei der Oeffnung inducirten tertiären Strömen, so dass also die Zeiten t und t_1 des Verlaufs beider tertiären Ströme beim Schliessen weniger von einander verschieden sind. Die an beiden Elektroden durch die tertiären Ströme entwickelten Gasmengen verhielten sich sowohl bei den beim Oeffnen, wie den beim Schliessen inducirten Strömen nahezu wie 1 : 2, so dass also nur die beiden tertiär inducirten Ströme hinlängliche elektromotorische Kraft besassen, um die Polarisation zu überwinden.

Die Resultate sind indess ziemlich complicirt.

Der durch das Ansteigen des secundären Stromes inducirte tertiäre Strom (a) findet zunächst noch keine Polarisation des Voltameters vor und durchfliesst letzteres, so wie das Galvanometer. Seine Intensität nimmt aber, auch abgesehen von der Abnahme seiner eigenen elektromotorischen Kraft während der Induction, durch die allmählich sich bildende Polarisation ab. Tritt dann der entgegengerichtete, durch das Verschwinden des secundären Stromes inducirte tertiäre Strom (b) auf, so addirt sich seine elektromotorische Kraft zu der der Polarisation, welche dabei zugleich zum Theil oder ganz aufgehoben wird. Bei ganz gleichem Verlauf würde daher die Gesammtintensität des so verstärkten Stromes b grösser sein, als die Gesammtintensität des durch die Polarisation geschwächten Stromes a, und das Galvanometer würde im Sinne des Stromes b ausschlagen.

Da aber die Stärke und das Anwachsen der Polarisation sich ganz nach der Stärke des allmählich entstehenden, polarisirenden Stromes richtet, und ebenso das Verschwinden der Polarisation denselben Bedingungen unterliegt, so lassen sich aus den Ablenkungen des Galvanometers ohne die Kenntniss des Verlaufs der Polarisation keine sicheren Schlüsse über die Schnelligkeit des Verlaufs der Inductionsströme ziehen.

153 In anderer Art wird die Zeit der Entwickelung von Inductionsströmen verändert, wenn gleichzeitig in zwei neben einander liegenden Leitern Inductionsströme durch das Oeffnen oder Schliessen eines primären Stromes inducirt werden. Befindet sich zwischen der Inductionsspirale B und der inducirenden Spirale A kein Leiter, so verläuft der in B inducirte Strom in einer gewissen Zeit nach dem Oeffnen von A. Wird aber zwischen die Spiralen ein guter Leiter, eine Metallplatte

oder eine in sich geschlossene Spirale *C* gestellt, so wird auch in diesen ein Strom inducirt, welcher im Wesentlichen denselben Verlauf hat, wie der Strom in *B*. Wenn also letzterer anwächst, so steigt auch der Strom in *C* an.

Durch die Aenderungen dieses letzteren Stromes werden wiederum in *B* Inductionsströme höherer Ordnung hervorgerufen, welche anfangs den direct in *B* inducirten entgegengesetzt und in jeder Zeiteinheit um so stärker sind, je schneller sich die Intensität der in *C* inducirten Ströme ändert. So nimmt die Intensität der Inductionsströme in *B* langsamer zu. Nachher verschwinden die Inductionsströme in *C*; in *B* werden jetzt tertiäre Ströme inducirt, welche denen in *C* gleichgerichtet sind, so dass die ganze Induction in *B* verzögert ist, die Intensität des in *B* inducirten Stromes in den einzelnen Momenten seines Verlaufes kleiner ist, als ohne Zwischenschaltung des Leiters *C*. Die Gesammtintensität des Stromes in *B* bleibt indess auch hier ungeändert, da der in *C* inducirte Strom entsteht und vergeht, und die durch sein Anwachsen und sein Verschwinden inducirten elektromotorischen Kräfte gleich und entgegengesetzt sind.

Die Aenderungen des Verlaufes der Inductionsströme in *B* und *C* wirken selbstverständlich auf den Verlauf des Anwachsens und Verschwindens des inducirenden Stromes der primären Spirale zurück. — Eine Berechnung aller hierbei stattfindenden Vorgänge ist in ähnlicher Weise, wie für die §§. 137 u. flgde. betrachteten Fälle vorzunehmen, sie gestaltet sich indess noch verwickelter [1]).

154 Wie in einer geschlossenen Spirale der durch eine primäre Spirale inducirte Strom eine gewisse Zeit zu seinem Verlaufe nöthig hat, so hat man auch eine gewisse Dauer von Inductionsströmen in geöffneten Inductionskreisen nachzuweisen gesucht.

So umgab Marianini [2]) eine inducirende Spirale mit einer Inductionsspirale und verband durch eine Wippe erst die erstere mit einer Säule und sodann unmittelbar darauf die letztere mit einem Galvanometer. Der Ausschlag der Nadel desselben zeigte die Bildung eines Inductionsstromes an, der den ersten Moment der Schliessung des inducirenden Stromes überdauerte.

Es konnte dies indess auch davon herrühren, dass der primäre Strom in Folge der in seiner Schliessung sich bildenden Extraströme selbst eine gewisse Zeit zum Ansteigen bis zum Maximum seiner Intensität brauchte, und die Schliessung des inducirten Kreises noch innerhalb dieser Zeit erfolgte; oder auch daher, dass Marianini zu seinen Versuchen inconstante Säulen anwendete, deren Strom schnell seine Intensität änderte. Wenigstens konnte E. du Bois-Reymond [3]) bei

---

[1]) Vergl. auch Strutt, Phil. Mag. [4] **38**, p. 1, 1869*. — [2]) Marianini, Ann. de Chim. et de Phys. [3] **11**, p. 395, 1844*. — [3]) E. du Bois-Reymond, Untersuchungen, **1**, p. 426, 1848*.

Anwendung einer constanten Säule hierbei keine Ablenkung der Galvanometernadel erhalten.

In gleicher Weise hatte Marianini zuerst im Jahre 1841 gezeigt, dass, wenn man nach dem Oeffnen des primären Kreises die Inductionsspirale durch die Wippe mit dem Galvanometer verbindet, die Nadel desselben einen Ausschlag zeigt. Dies geschieht selbst, wenn kein Eisenkern in der Spirale liegt. — Denselben Versuch hatte E. du Bois-Reymond mit gleichem Erfolge wiederholt.

In ähnlicher Weise hatte auch schon Fechner[1]) beobachtet, dass beim Oeffnen des Schliessungskreises eines durch ein Galvanometer geleiteten Stromes die Nadel desselben nicht gleich wieder dieselbe Schwingungsdauer wie vor dem Einfluss des Stromes besass. Es schien ihm dies nicht allein durch eine Veränderung des Magnetismus der Nadel bedingt zu sein. Auch Boisgiraud und Arago[2]) haben öfter als sie den kupfernen Schliessungsdraht von der Säule lostrennten, an demselben magnetische Wirkungen beobachtet. Er sollte sogar dann noch Eisenfeile anziehen können.

Es scheint also eine gewisse Zeit zu dauern, bis der Oeffnungsinductionsstrom in der Inductionsspirale völlig verschwindet, oder auch bis der denselben erzeugende inducirende Strom nach dem Oeffnen der primären Leitung völlig auf Null herabsinkt.

Diesen Resultaten widerspricht indess ein Versuch von Helmholtz[3]). Er leitete einen Strom durch eine Spirale von 64 m Drahtlänge, trennte sie sodann durch die Wippe (Fig. 40, S. 105) von der Säule los und verband sie mit dem Körper oder einem Multiplicator. Vermittelst Verstellens der Schrauben *mm* der Wippe wurde bewirkt, dass die Loslösung von der Säule und die neue Schliessung so schnell erfolgten, dass sich gerade eine physiologische oder galvanometrische Wirkung des Oeffnungsstromes einstellte. Wurde nun vermittelst der §. 126 beschriebenen Methode der Ausschlag bestimmt, welcher die Zeit zwischen dem Oeffnen und Schliessen der Spirale misst, so lag derselbe zwischen 1,73 und 1,83; er war nur so gross, wie wenn Oeffnung und Schliessung gleichzeitig erfolgten. Hiernach überdauert der Oeffnungsextrastrom die Zeit des Oeffnens des inducirenden Stromes nicht. Die positiven Resultate der übrigen Beobachter könnten vielleicht durch eine nicht ganz vollständige Isolation der inducirenden und Inductionsspirale von einander hervorgerufen sein. (Vergleiche auch die Versuche von Beetz, w. u.)

155 Wenn indess die inducirende Spirale an ihren Verbindungsstellen mit der Säule zugleich mit zwei Condensatorplatten verbunden ist, welche

---

[1]) Fechner, Lehrb., p. 153, 276, 1829*. — [2]) Arago und Boisgiraud, Ann. de. Chim. et de Phys. **15**, p. 101, 1820*. — [3]) Helmholtz, Pogg. Ann. **83**, p. 533, 1851*.

sich durch die Säule zu demselben elektrischen Potential laden, wie die Pole derselben, und beim Loslösen der Spirale von der Säule ihre Enden mit jenen Platten verbunden bleiben, so dauert der Oeffnungsextrastrom längere Zeit an, bis sich der Condensator, sei es allmählich durch directe, sei es durch alternirende Ströme entladen hat. Dann kann auch die inducirende Spirale nach dem Oeffnen in der Inductionsspirale Ströme erzeugen. Ebenso kann, wenn die Enden der geöffneten Inductionsspirale mit einem Condensator oder mit Conductoren von grösserer Capacität verbunden sind, als welche auch die über einander liegenden Windungen der Enden der Spirale selbst dienen können, ein in derselben inducirter Strom diese letzteren laden, und durch ihre Entladung rückwärts ein länger dauernder Inductionsstrom erzeugt werden (siehe weiter unten).

b. Einfluss des zeitlichen Verlaufes der galvanischen Inductionsströme in geschlossenen Kreisen auf ihre Wirkungen.

156 Nachdem wir im Vorhergehenden die Bildung der Inductionsströme, sowohl in benachbarten Leitern, wie als Extraströme in den von einem veränderlichen galvanischen Strom durchflossenen geschlossenen Leitern selbst kennen gelernt haben, wollen wir noch einmal die Wirkungen der Inductionsströme, sowie die Folgen ihres Einflusses auf den zeitlichen Verlauf der primären Ströme im Zusammenhange betrachten.

Die Wirkungen der inducirten Ströme sind theils von dem Verlauf ihrer Bildung unabhängig, und nur durch die im Ganzen durch jeden Querschnitt ihrer Leitung geführten Elektricitätsmengen bedingt, theils von ihrem zeitlichen Verlauf abhängig.

Zu den ersten Wirkungen gehören die galvanometrischen und chemischen, zu den zweiten die thermischen, elektrostatischen, elektrodynamischen und magnetisirenden.

157 1. Galvanometrische Wirkungen der Inductionsströme. Lenkt ein galvanischer Strom von kurzer Dauer, z. B. ein Inductionsstrom, eine in den Windungen eines Multiplicators hängende Magnetnadel ab, und ist seine Zeitdauer gegen die Schwingungsdauer der Nadel sehr klein, so ist die aus dem ersten Ausschlag berechnete ablenkende Kraft des Stromes proportional der gesammten, bei der Nadel vorbeifliessenden Elektricitätsmenge.

Wird daher ein Inductionsstrom in einer Drahtspirale B erregt, indem man den Schliessungskreis einer neben derselben befindlichen und vom Strome durchflossenen Drahtspirale A einmal langsam und sodann schnell öffnet, so schlägt die Nadel eines in den Schliessungskreis von B eingeschalteten Galvanometers um gleich viel aus, vorausgesetzt,

dass die Zeit des Oeffnens in beiden Fällen so klein ist, dass man die Ablenkung der Nadel aus ihrer Ruhelage während jener Zeit selbst als verschwindend klein annehmen kann, dieselbe also von dem ganzen, während des Processes des Oeffnens inducirten Strome nahezu in der Ruhelage getroffen wird. Wenngleich in beiden Fällen die Intensität des Inductionsstromes in gleichen Zeiten nach dem Oeffnen sehr verschieden ist, so ist doch die Summe der Gesammtintensität während der ganzen Zeit des Oeffnens des inducirten Stromes gleich, und so auch die galvanometrische Wirkung desselben.

Ebenso zeigt sich durch das Galvanometer die Gesammtintensität des beim Oeffnen und des beim Schliessen eines Stromes in einer benachbarten Spirale erregten Inductionsstromes gleich gross, wenn schon der letztere weit langsamer verläuft, als der erstere.

158 Auch wenn man zwischen die inducirende und Inductionsspirale Metallhüllen oder Metallplatten oder in sich geschlossene Spiralen einschiebt, in denen beim Oeffnen des inducirenden Kreises Inductionsströme entstehen, welche wiederum inducirend auf die Inductionsspirale wirken und dadurch die Entwickelung der Oeffnungsströme in ihr verzögern, ändert sich die galvanometrische Wirkung nicht [1]).

Dies zeigen unter anderen einige Versuche von Faraday [2]).

Zwischen zwei flache Bandspiralen *A* und *B*, deren Enden mit den beiden Windungsreihen eines Differentialgalvanometers in entgegengesetztem Sinne verbunden waren, wurde eine dritte Bandspirale *C* gestellt, und dieselbe so lange verschoben, bis die Inductionsströme, welche beim Schliessen oder Oeffnen des durch sie hindurchgeleiteten Stromes in den Spiralen *A* und *B* erzeugt wurden, einander gleich waren, die Nadel des Galvanometers also in Ruhe blieb. Wurde nun zwischen die eine der beiden Spiralen *A* und *B* und Spirale *C* eine Platte von Schwefel oder auch eine Kupferplatte geschoben, so änderte sich die galvanometrische Gleichheit der in *A* und *B* inducirten Ströme nicht.

Ebenso waren die am Galvanometer gemessenen Intensitäten der Ströme, welche in einer flachen Spirale beim Annähern und Entfernen eines Magnetes inducirt wurden, einander gleich, mochte zwischen die Spirale und den Magnet eine Schwefel- oder eine Metallplatte gestellt werden oder nicht.

Faraday legte ferner zwei cylindrische Drahtspiralen (mit Eisenkernen) oder zwei flache Drahtspiralen conaxial neben einander, so dass zwischen ihnen ein Zwischenraum von $^7/_4$ Zoll blieb. In diesen Zwischenraum wurde ein feststehender Magnetpol gebracht, und die freien Enden

---

[1]) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. 7, p. 464, 1843* und nochmals Lallemand, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 2, p. 454, 1864*. — [2]) Faraday, Exp. Res. Ser. 14, §§. 1709 bis 1725, 1838*.

der in entgegengesetzter Richtung mit einander verbundenen Spiralen wurden mit dem Galvanometer verbunden. Wurde zwischen den Pol und die eine oder andere der Spiralen eine Platte von Schellack, Schwefel, Kupfer von 0,7 bis 0,9 Zoll Dicke eingeschoben, so ergab sich nicht die geringste Wirkung, auch nicht, als die Schellack- oder Kupferplatte rotirte. Also auch hier hoben sich die Inductionsströme, welche secundär durch die in der Kupferplatte u. s. f. inducirten Ströme in der benachbarten Drahtspirale inducirt worden waren, zusammen völlig auf. — Wurde statt der Kupferplatte eine Eisenplatte zwischen den Magnet und die eine Spirale geschoben, so entstand ein Inductionsstrom, da dieses Verfahren dem Annähern des Magnetes an die Spirale gleich kam. Aus demselben Grunde bleibt der an einem Galvanometer gemessene Integralstrom, welcher in einem Draht inducirt wird, in dessen Nähe ein durch einen Paralleldraht geleiteter Strom geöffnet oder geschlossen wird, ungeändert, wenn man den letzteren Draht (einen Telegraphendraht) mit einer von ihm isolirten, resp. zum Boden abgeleiteten Metallhülle umgiebt [1]).

2. Die chemischen Wirkungen der inducirten Ströme verhalten sich wie die galvanometrischen; die Quantität der durch dieselben abgeschiedenen Ionen ist der gesammten, durch den Elektrolyt in einer Richtung hindurchgehenden Elektricitätsmenge direct proportional, also im Ganzen von der Zeitdauer der Inductionsströme unabhängig. — Da indess bei einer abwechselnden Reihe von Schliessungs- und Oeffnungsströmen die in derselben Zeit durch erstere an den Elektroden abgeschiedenen Mengen der Ionen wegen ihres langsameren Verlaufes kleiner sind, als durch letztere, so kann es kommen, dass ein grösserer Theil der durch die Schliessungsströme abgeschiedenen Ionen sich von den Elektroden entfernt, bevor sie sich mit den durch die Oeffnungsströme ausgeschiedenen Ionen vereinen, wodurch eine Polarisation der Elektroden im Sinne der letzteren eintreten kann. 159

Bezeichnen wir die Intensität der Inductionsströme in jedem Zeitelemente mit idt, die Zeit ihres Verlaufes mit t, so ist die Wirkung auf die Magnetnadel des Galvanometers oder, abgesehen von den erwähnten Nebenumständen, die Menge der in der Zeiteinheit abgeschiedenen Ionen gegeben durch die Summe $Q = c\int_0^t idt$, wo c eine Constante ist. Ist diese Summe dieselbe, so bleibt Q ungeändert. 160

3. Die elektrodynamischen Wirkungen der Inductionsströme verhalten sich anders. 161

---

1) H. de Meaux, Compt. rend. 88, p. 177, 1879*; Beibl. 3, p. 375*.

Leitet man die Inductionsströme gleichzeitig durch die feste Rolle S und die Bifilarrolle S_1 eines Elektrodynamometers, so ist ihre elektrodynamische Wirkung proportional dem Werthe $\int_0^t e^2 dt$, wenn e die elektromotorische Kraft des inducirten Stromes in jedem Moment seines Verlaufes, t seine Zeitdauer ist. Vorausgesetzt, dass in allen Fällen die gesammte elektromotorische Kraft des Inductionsstromes $\int_0^t e\,dt$ dieselbe bleibt, ist der Werth $\int_0^t e^2 dt$ um so grösser, je kleiner die Zeit t ist, je grösser also in jedem Moment die elektromotorische Kraft e des Inductionsstromes ist.

Werden die Werthe e und e^2 als Ordinaten, die Zeiten als Abscissen aufgetragen, und ist der Abstand des Schwerpunktes der Fläche $\int e\,dt$ von der Abscissenaxe gleich A, so ist

$$\int_0^t e^2 dt = A \int_0^t e\,dt$$ [1]).

Leitet man also die Inductionsströme gleichzeitig durch ein Galvanometer und ein Dynamometer, so kann man aus den Angaben beider Instrumente ihre gesammte Zeitdauer und ihre mittlere Intensität während der Zeiteinheit bestimmen.

162 Für die Messung der Zeitdauer der Extraströme bietet diese Methode insofern Schwierigkeiten dar, als der constante Strom, welcher die Dynamometerrollen durchfliesst, neben den in seinem Schliessungskreise auftretenden Extraströmen eine Ablenkung der Bifilarrolle hervorruft. Es bedarf deshalb besonderer Drahtverbindungen, um diesen Uebelstand zu vermeiden. — Eine solche Verbindung ist von Rijke [2]) angegeben worden. Dazu wurde der von Edlund (vergl. §. 53) construirte, Fig. 54 gezeichnete Apparat benutzt, bei welchem nur noch die Punkte m und o der Leitung mit dem Dynamometer n verbunden wurden. Der Apparat ist dann eine Wheatstone'sche Drahtcombination, in deren Brücke das Dynamometer eingeschaltet ist. Richtet man das Verhältniss der Widerstände der verschiedenen Zweige, $dAm = r_1$, $mabe = r_2$, $dko = r_3$, $ofhe = r_4$ so ein, dass sich $r_1 : r_2 = r_3 : r_4$ verhalten, so fliesst durch den das Dynamometer enthaltenden Zweig mno der Strom der Säule S nicht. Oeffnet oder schliesst man also den Zweig dSe z. B. bei l, so ist die Ablenkung der Dynamometerrolle nur durch den in der Spirale A erzeugten Extrastrom bedingt. Ist der

---

1) Fuchs, k. Sächs. Ber. 1874, p. 81*. — 2) Rijke, Pogg. Ann. 102, p. 497, 1857*.

Widerstand des Zweiges $mno = r_0$, so erhält man mit Hülfe der **Kirchhoff**'schen Formeln die Intensität des Stromes im Zweige r_0 gleich

$$i_0 = \frac{E_1 r_2}{r_0 (r_1 + r_2) + r_2 (r_1 + r_3)},$$

wo E_1 die elektromotorische Kraft des Extrastromes in der Spirale A ist. Durch einen eigenen Commutator wurde vermittelt, dass nach dem Loslösen der Säule von der Verbindung mit d und e ihr ein gleich grosser Widerstand in einem besonderen Schliessungskreise geboten wurde, um so die Einflüsse des Schwankens ihrer elektromotorischen Kraft zu beseitigen. Die regelmässige Schliessung und Oeffnung des inducirenden Stromes bei l wurde durch einen Elektromagnet vermittelt, welcher durch einen besonderen, durch den Commutator in Thätigkeit gesetzten Strom erregt wurde. Der Elektromagnet zog einen Hebel an und trennte dadurch zwei an und unter demselben befestigte, den Strom der primären Säule leitende Platinstifte, welche bei Unterbrechung des den Elektromagnet erregenden Stromes wieder gegen einander fielen und die Verbindung der Säule S mit den Punkten e und d wieder herstellten.

Fig. 54.

Wenngleich aus den §. 157 mitgetheilten Versuchen folgt, dass der Oeffnungs- und Schliessungsextrastrom gleiche Gesammtintensität besitzen, war doch die Ablenkung der Bifilarrolle des Dynamometers durch beide sehr verschieden.

Sie betrug z. B.

beim Oeffnungsextrastrom	. . .	1,24 Scalentheile,
„ Schliessungsextrastrom	. .	7,14 „

Das analoge Resultat ergab sich beim Einschieben von Eisenkernen in die Inductionsspirale. Hier betrugen die Ablenkungen der Bifilarrolle

durch den Oeffnungsextrastrom	. .	17,85 Scalentheile,
„ „ Schliessungsextrastrom	.	66,01 „

Entgegen den übrigen Erfahrungen würde also die Zeitdauer des Schliessungsextrastromes scheinbar kleiner sein, als die des Oeffnungs-

extrastromes. Indess liegt dies nur daran, dass die den Extraströmen bei geschlossener und geöffneter Kette gebotenen Widerstände nicht gleich sind. Bezeichnet man nämlich die elektromotorische Kraft der Säule S mit E, den Widerstand des Zweiges dSe mit r, und wirkt gleichzeitig mit E eine zweite elektromotorische Kraft E_1 in der Spirale A, während die Säule S mit d und e verbunden ist, so ergiebt sich die Intensität I_1 des Stromes in dem Zweige dAm:

$$I_1 = \frac{E r_3}{r(r_1 + r_3) + r_3(r_1 + r_2)}$$
$$+ E_1 \frac{[r_0(r_1 + r_2) + r_2(r_1 + r_3)](r + r_3) - r_2(r_0 r - r_2 r_3)}{[r_0(r_1 + r_2) + r_2(r_1 + r_3)][r(r_1 + r_3) + r_3(r_1 + r_2)]} = \frac{E}{W_0} + \frac{E_1}{W_1}$$

Ist die Verbindung mit der Säule in d und e aufgehoben, also $E = o$ und $r = \infty$, und wirkt dann in A die elektromotorische Kraft e_1, so ist die Intensität i_1 des Stromes in dAm:

$$i_1 = e_1 \frac{r_0 r_1 + r_1 r_2 + r_2 r_3}{[r_0(r_1 + r_2) + r_2(r_1 + r_3)](r_1 + r_3)} = \frac{e_1}{w_1}.$$

Bezeichnen die Werthe I_1 und i_1 die Intensitäten der nach der Verbindung und Loslösung der Säule S von d und e durch die Spirale A fliessenden Ströme, ist P das Potential der Spirale auf sich selbst, die Inductionsconstante gleich 1, so sind die in jedem Moment in A inducirten elektromotorischen Kräfte $E_1 = -P dI_1/dt$ und $e_1 = -P di_1/dt$.

Bei Einführung dieser Werthe in obige Gleichungen erhalten wir:

$$I_1 = \frac{E}{W_0} - \frac{P}{W_1}\frac{dI_1}{dt} \text{ und } i_1 = -\frac{P}{w_1}\frac{di_1}{dt},$$

daher

$$I_1 = \frac{E}{W_0}\left(1 - e^{-\frac{W_1}{P}t}\right); \quad i_1 = \frac{E}{W_0} e^{-\frac{w_1}{P}t}.$$

Die in jedem Moment in A inducirten elektromotorischen Kräfte sind demnach:

$$E_1 = -P\frac{dI_1}{dt} = -\frac{EW_1}{W_0} e^{-\frac{W_1}{P}t} \text{ und } e_1 = -P\frac{di_1}{dt} = \frac{Ew_1}{W_0} e^{-\frac{w_1}{P}t};$$

die während der ganzen Zeit der Intensitätsänderung inducirten elektromotorischen Kräfte aber

$$E_s = -\frac{EP}{W_0} \text{ und } e_s = \frac{EP}{W_0}.$$

Obgleich also die gesammten elektromotorischen Kräfte des Schliessungs- und Oeffnungsextrastromes, wie zu erwarten, die gleichen sind, so sind doch die elektromotorischen Kräfte und Intensitäten dieser Ströme in den einzelnen Momenten verschieden, da ihnen verschiedene Widerstände geboten werden, und daher können auch die Angaben des Dynamometers in dem Zweige mno in beiden Fällen nicht gleich sein.

163 Wir haben oben erwähnt, dass eine um die Inductionsspirale gelegte geschlossene Metallhülle oder eine zweite in sich geschlossene Drahtrolle die Gesammtintensität der inducirten Ströme, also auch der Extraströme nicht ändert. Dies hat Rijke (l. c.) gleichfalls mit dem erwähnten Apparate gezeigt, indem er die Spirale A mit einer zweiten Spirale umgab und nach Lostrennung des Dynamometers n die Ausschläge des Galvanometers bestimmte, wenn sie geschlossen oder geöffnet war. In beiden Fällen ergab sich der Ausschlag gleich, sowohl bei Untersuchung der Schliessungs- als auch bei der der Oeffnungsströme. Dasselbe fand statt, als die Inductionsspirale noch einen Eisenkern enthielt.

Untersuchte er aber nach Einfügung des Dynamometers die Ausschläge desselben, so waren sie nach dem Schliessen der die Inductionsrolle umgebenden secundären Rolle bedeutend kleiner. So betrug z. B. dieser Ausschlag in Scalentheilen bei zwei Versuchsreihen, bei denen der primäre Strom durch sechs Elemente erregt wurde und die Inductionsspirale keinen Eisenkern enthielt (I), sowie bei Anwendung von vier Daniell'schen Elementen und einem Eisenkern (II):

	I		II	
	Oeffnungs-extrastrom	Schliessungs-extrastrom	Oeffnungs-extrastrom	Schliessungs-extrastrom
Secundäre Rolle, offen . . .	1,31	6,91	17,59	78,6
„ „ geschlossen	0,63	3,75	5,66	12,06

Die Zeitdauer der Extraströme ist also bei geschlossener secundärer Spirale weit grösser, ganz entsprechend den oben ausgeführten Betrachtungen.

Bei Anwendung eines Eisenkernes ist die Verzögerung des Schliessungsstromes viel bedeutender, als die des Oeffnungsstromes.

164 Leitet man die Inductionsströme nur durch die Bifilarrolle des Dynamometers, durch die feste Rolle aber einen constanten Strom von der Intensität I, und ist die variable Intensität des Inductionsstromes gleich i, seine Zeitdauer t, so ist die die Bifilarrolle ablenkende Kraft

$$\int_0^t Iidt = I\int_0^t idt.$$

In diesem Falle ist die Ablenkung nur von der Gesammtintensität des Inductionsstromes, nicht von seiner Zeitdauer abhängig, vorausgesetzt immer, dass dieselbe gegen die Schwingungsdauer der Bifilarrolle klein ist. Dies zeigen auch die folgenden Versuche von Lallemand [1]).

[1]) Lallemand, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 22, p. 19, 1848*.

Er befestigte an dem einen Arm des Hebels einer Drehwage eine flache Spirale S, Fig. 55, deren Enden in zwei, in der Drehungsaxe des Hebels befindliche Quecksilbernäpfe a und b eintauchten. Der Hebel hing an einem Messingdraht. Seitlich war neben der flachen Spirale eine zweite gleiche Spirale S_1 fest aufgestellt.

Fig. 55.

Wurde durch die Spirale S_1 ein constanter Strom geleitet, durch die Spirale S aber inducirte Ströme in der einen oder anderen Richtung, so war die elektrodynamische Wirkung, welche dem Torsionswinkel T entsprach, um den man den Kopf der Drehwage drehen musste, um die Spirale S an ihre frühere Stelle zu bringen, der Intensität I des die inducirten Ströme erzeugenden, inducirenden Stromes proportional, wie z. B. die folgende Tabelle ergiebt:

I	0,30	0,44	0,75	0,82	0,98
T	220	337	575	640	795
const T/I	733	766	767	780	811

Ferner wurde die Spirale S in sich geschlossen und durch die Spirale S_1 ein constanter Strom geleitet. Beim Schliessen dieses Stromes wurde ein Strom in S inducirt, der eine Abstossung von S, beim Oeffnen ein Strom, der eine Anziehung von S zur Folge hatte.

Dabei war die durch den Schliessungsstrom erzeugte Abstossung grösser, als die durch den Oeffnungsstrom bewirkte Anziehung. Entsprechend tritt bei schnell wiederholtem Oeffnen und Schliessen des Stromes in S_1 vermittelst eines Commutators Abstossung von S ein. Hier ist also die elektrodynamische Wirkung des Schliessungsstromes grösser, als die des Oeffnungsstromes. Der Grund hiervon ist der, dass der Oeffnungsinductionsstrom noch einige Zeit nach dem Oeffnen des inducirenden Stromes fortdauert, so dass die elektrodynamische Wirkung des letzteren auf den ersteren nicht während der ganzen Zeit seines Verlaufes ausgeübt wird, während dagegen der Schliessungsstrom sich ganz innerhalb der Dauer des inducirenden Stromes bildet und so während seines ganzen Verlaufes die elektrodynamische Abstossung durch denselben erleidet.

Werden indess durch die Spirale S abwechselnd die in einer besonderen Inductionsspirale erzeugten Oeffnungs- und Schliessungsströme geleitet, durch S_1 aber ein continuirlicher Strom, so heben sich die elektrodynamischen Wirkungen gerade auf.

Auch wenn durch die Spirale S_1 inducirte Ströme von constanter Intensität geleitet wurden, welche in der in sich geschlossenen Spirale S tertiäre Ströme inducirten, ergaben sich analoge Resultate [1]).

4. Die thermischen Wirkungen der Inductionsströme entsprechen ihren elektrodynamischen Wirkungen, wenn sie gleichzeitig durch beide Rollen des Dynamometers geleitet werden. Sie sind ebenfalls der Summe der Quadrate der Intensitäten der inducirten Ströme in jedem Moment proportional. Dies hat Edlund [2]) nachgewiesen, indem er in einer Inductionsrolle von 118 mm Länge und 135 mm innerem Durchmesser von 0,75 mm dickem Kupferdraht durch Oeffnen und Schliessen einer hineingeschobenen und vom Strom durchflossenen inducirenden Spirale vermittelst eines Zahnrades Inductionsströme erregte und sie entweder durch ein Dynamometer oder durch einen dünnen, zwischen zwei Messingsäulen ausgespannten Platindraht leitete. Gegen denselben waren an zwei gegenüber liegenden Stellen ein cylindrisches Wismuth- und Antimonstückchen gedrückt, welche mit einem Spiegelgalvanometer in Verbindung standen. Die Ausschläge G des letzteren waren den Temperaturerhöhungen proportional. So war unter Anderm bei fünf verschiedenen Stromintensitäten und Dynamometerausschlägen D bei einer gleichen Zahl von Unterbrechungen: **165**

D	98,8	73,7	52,4	40,9	18,3
G	113,3	82,8	60,1	46,8	20,3
$G = 1{,}14\,D$ (ber.)	112,6	84,1	59,7	46,6	20,9

Dasselbe Verhältniss zeigte sich, als bei jeder Unterbrechung des inducirenden Stromes an Stelle der Säule durch eine besondere Feder am Unterbrechungsrade eine Nebenschliessung in den inducirenden Kreis eingefügt wurde.

Bei öfterem Schliessen und Oeffnen waren sowohl die Dynamometer-, wie die Galvanometerausschläge der Zahl der Unterbrechungen proportional; die Inductionsströme waren also jedesmal bis zum Maximum angewachsen.

Schon §. 94 haben wir erwähnt, dass bei dem Ansteigen eines geschlossenen Stromes die während der Lösung eines Aequivalents Zink entwickelte Wärmemenge einen um den Werth $A_a = R(I - i)\,i$ kleineren Arbeitswerth besitzt, als ohne die Inductionswirkungen, wo R der Widerstand der Schliessung, i und I die Stromintensitäten mit und ohne Induction sind. Nach §. 121 können wir die Intensität i durch die Formel $i = I\,(1 - e^{-t/c})$ ausdrücken, wo $c = P/R$ eine von dem **166**

[1]) Die von Lallemand (Ann. de Chim. et de Phys. [3] **32**, p. 432, 1851*) beim Hindurchleiten der Inductionsströme durch beide Rollen S und S_1 erhaltenen Resultate konnten wegen Nichtbeachtung der oben erwähnten Umstände, sowie wegen nicht vollständiger Anwendung des Ohm'schen Gesetzes keine allgemeineren Resultate geben. — [2]) Edlund, Pogg. Ann. **123**, p. 193 u. f. 1864*.

Widerstand R und dem Potential P der Spirale auf sich selbst abhängige Constante ist. Wird dieser Werth in die Gleichung für A_a eingeführt, so ist die während der ganzen Zeit des Ansteigens der Intensität des Stromes geleistete Nebenarbeit

$$A_a = R\int_0^\infty I^2 e^{-\frac{t}{c}}\left(1 - e^{-\frac{t}{c}}\right) dt = \frac{1}{2} R c I^2 = \frac{1}{2} P I^2 \quad . \quad . \quad 2)$$

Sie ist also dem halben Potential der Spirale auf sich selbst gleich.

Diese Arbeit wird zur Erzeugung des Stromes selbst verwendet. Sie ist gleich der Arbeit, welche erforderlich wäre, um die Spirale, in welcher die Induction stattfindet, während sie vom Strom I durchflossen ist, in eine Form zu bringen, in der ihre Windungen keine Induction auf einander ausüben [1]).

Die auf diese Weise nicht sichtbar auftretende Nebenarbeit erscheint demnach als potentielle Energie. Ob dieselbe in einer für uns unmerkbaren Bewegung des Mediums besteht, in welchem der Leiter liegt, werden wir im Schlusscapitel betrachten. Wird nach Herstellung des Stromes die Säule aus dem Schliessungskreise entfernt und an ihre Stelle ein Draht von gleichem Widerstand mit ihr gesetzt, so ist die Intensität des Oeffnungsstromes in jedem Moment $i_0 = I e^{-\frac{t}{c}}$; also die ganze durch denselben gethane Arbeit gleich

$$A_o = R\int_0^\infty \left(I e^{-\frac{t}{c}}\right)^2 dt = \frac{1}{2} R c I^2 = \frac{1}{2} P I^2.$$

Diese Arbeit tritt im Schliessungskreise als Wärme auf. Dabei wird also der ganze durch den Anfangsextrastrom bewirkte Wärmeverlust im Schliessungskreise wieder gewonnen. Wäre der Widerstand desselben hierbei nicht mehr R, so bliebe doch der Werth $\frac{1}{2} P I^2$ constant und die gethane Arbeit A_o wäre dieselbe [2]).

Wird der Schliessungskreis einfach unterbrochen, ohne durch einen an die Stelle der Säule gesetzten Draht zugleich wieder geschlossen zu werden, so zeigt sich die durch den Oeffnungsstrom erzeugte Wärme namentlich im Oeffnungsfunken.

167 Befindet sich in der in den Schliessungskreis eingesetzten Spirale ein Eisenkern, so wird der beim Schliessen des Stromes entstehende Extrastrom intensiver, der Wärmeverlust in dem Schliessungskreise und die Arbeit A_a ist bedeutender. Die letztere wird hier, ausser zur Strombildung, zum grossen Theil auch auf die Magnetisirung des Eisens ver-

---

[1]) Vergl. auch einige Betrachtungen von Marié Davy über das allmähliche Anwachsen des Stromes, welche er an die Voraussetzung einer vielleicht vorhandenen „Diathermanität der Körper für Elektricität" knüpft. Compt. rend. 52, p. 917, 958 und 1243, 1861*. — [2]) Koosen, Pogg. Ann. 91, p. 436, 1854*.

wendet. Sie wird, wie vorher, beim Oeffnen der Schliessung und bei der dabei erfolgenden Entmagnetisirung des Eisens als Wärme wieder gewonnen. Indess ist dies nur in so weit richtig, als die Theilchen des Eisens unendlich leicht beweglich gedacht werden. Da dies nicht der Fall ist, sondern vielmehr eine innere Reibung bei ihrer Umlagerung während der Magnetisirung auftritt, so wird ein Theil der Arbeit A_a in dem Eisenkern selbst in Wärme verwandelt, und dieser Theil kann bei dem Oeffnen des Stromes nicht wieder gewonnen werden [1]) (s. w. u.).

Während des Andauerns der Magnetisirung eines Eisenkerns wird selbstverständlich keine Arbeit zur Erhaltung derselben gebraucht, da die Magnetisirung in der Herstellung eines statischen Zustandes besteht. Würden wir daher einen Schliessungskreis auf das $n$fache verlängern, dabei aber seine Leitungsfähigkeit oder seinen Querschnitt in gleichem Verhältniss vergrössern, so würde die Intensität des Stromes dieselbe bleiben; wir könnten aber jetzt durch denselben statt eines, n Eisenkerne magnetisiren. So kann also bei gleicher Intensität der magnetische Effect des Stromes ins Unendliche wachsen, während der thermische Effect des Stromes, bei dem er beständig eine Arbeit leisten muss, ein Maximum erreicht [2]).

168 Ganz ähnliche Resultate ergeben sich, wenn man die Inductionserscheinungen in einer Spirale betrachtet, welche eine zweite inducirende umgiebt. Die in der Säule durch die chemischen Processe erzeugte Arbeit erscheint vollständig in den verschiedenen Theilen der Schliessung. Wird also der inducirende Strom wiederholt geschlossen und geöffnet, so muss die gesammte Wärme, welche die Kette erzeugt, sich in der inducirenden und inducirten Spirale vollständig wiederfinden.

Dies hat auch Edlund [3]) gezeigt, indem er durch eine inducirende Spirale den Strom einer Grove'schen Säule leitete und denselben durch ein Blitzrad unterbrach. Dabei wurde durch eine besondere, gegen letzteres schleifende Feder beim Oeffnen des Stromkreises jedesmal an Stelle der Säule ein Draht von gleichem Widerstand mit der Säule eingeschaltet, so dass auch der Oeffnungsinductionsstrom sich in demselben entwickeln konnte. Der inducirenden Spirale war eine zweite Inductionsspirale gegenübergestellt. Zuerst wurde das Verhältniss der Widerstände R und r der Schliessungskreise beider Spiralen bestimmt. Dann wurde in den Schliessungskreis beider Spiralen ein mit einem Thermoelement (vergl. §. 165) versehener Platindraht eingefügt und die Erwärmung desselben bestimmt. Etwaige Abzweigungen der Ströme aus den Leitungen in das Thermoelement und zum Galvanometer konnten durch Wechseln der Stromesrichtung eliminirt werden (die sonstigen Correcturen s. in der Originalabhandlung).

---

[1]) Helmholtz, Pogg. Ann. **91**, p. 256, 1854*. — [2]) Poggendorff, Pogg. Ann. **73**, p. 345, 1848*. — [3]) Edlund, Pogg. Ann. **123**, p. 209 u. flgde. 1864*.

Ist die inducirte Spirale geöffnet, so sei die durch das Thermoelement beobachtete Erwärmung des Platindrahtes im inducirenden Kreise W, im inducirten w; ist die inducirte Spirale geschlossen, so seien diese Erwärmungen W_1 und w_1; dann entsprechen die Werthe WR, $W_1 R$, wr, $w_1 r$ den gesammten, in beiden Fällen in den beiden Kreisen erzeugten Wärmemengen. Da nun bei geschlossener Inductionsspirale die Stromintensität I in dem Kreise der inducirenden Spirale von dem Werth I bis auf den Werth $I - I_1$ abnimmt, so müssen in diesem Falle die Werthe $W_1 R$ und $w_1 r$ noch mit $I/(I - I_1)$ multiplicirt werden, um die Wärmeerzeugung bei gleichem Verbrauch an Zink in der erregenden Kette mit oder ohne Induction zu erhalten. So ergab sich z. B. der resultirende Werth der Wärmeerzeugung in der inducirenden Spirale U und U_1 vor und nach der Schliessung der Inductionsspirale und in der Inductionsspirale u_1:

$$U = 188{,}84, \quad U_1 = 177{,}26, \quad U - U_1 = 11{,}58, \quad u_1 = 12{,}66.$$

Der Wärmeverlust in der inducirenden Spirale beim Auftreten der Induction findet sich also in der Inductionsspirale wieder. Dasselbe Resultat ergeben andere Versuche.

Ist mithin die Intensität des Stromes in der inducirenden Spirale ohne Einfluss der Induction in einem gegebenen Moment gleich I; ist die Intensität des Inductionsstromes in der inducirten Spirale i_1, die des rückwärts in der inducirenden Spirale inducirten Stromes I_1, sind die Widerstände der Schliessungskreise beider Spiralen R und r, so ist bei gleicher Intensität des Stromes in der inducirenden Spirale, also bei gleichem Zinkverbrauch in beiden Fällen die erzeugte Wärme gleich

$$R \int I^2 dt = R \int (I - I_1)^2 dt + r \int i_1^2 dt,$$

oder

$$R \int (2 I I_1 - I_1^2) dt - r \int i_1^2 dt = 0.$$

169 Wird ein Strom in einem geschlossenen Drahtkreis inducirt, indem ihm ein zweiter vom Strom durchflossener Drahtkreis genähert oder von ihm entfernt wird, oder während umgekehrt ersterer dem letzteren gegenüber bewegt wird, so muss zu der bei der Auflösung eines Aequivalentes Zink im inducirenden Kreise entwickelten Wärme noch diejenige hinzutreten, welche der während derselben Zeit bei der relativen Bewegung der Leiter geleisteten Arbeit entspricht. Ist die letztere gleich A, das mechanische Wärmeäquivalent a, so ist mithin bei gleicher Berechnung, wie im vorigen Paragraphen

$$R \left(\int (I - I_1)^2 dt - \int I^2 dt \right) + r \int i_1^2 dt = \frac{A}{a}.$$

Besteht die Bewegung der Leiter in einer abwechselnden, in gleichen Zeiten $t - 0$ und $2t - t$ erfolgenden Annäherung und Entfernung, so sind die in beiden Zeiten in der inducirenden Spirale rückwärts indu-

cirten Ströme einander gleich und entgegengesetzt, und dann ist die gesammte, während der Zeit 0 bis $2t$ in dem inducirenden Kreise stattfindende Erwärmung

$$R\int_0^t (I-I_1)^2\,dt + R\int_t^{2t}(I+I_1)^2\,dt = 2I^2t + 2\int_0^t I_1^2\,dt.$$

Letzterer Werth entspricht der Erwärmung durch die rückwärts in der inducirenden Spirale inducirten Ströme für sich. Er ist häufig sehr klein, so dass die Intensität und Wärmeentwickelung im primären Kreise bei der Induction fast ungeändert bleibt.

Auf diese Weise liess Edlund in einer Drahtrolle, welche auf einen mit seiner Ebene vertical gestellten Messingring von 200 mm innerem Durchmesser und 60 mm Breite gewunden war, eine zweite, ähnliche Drahtrolle von 175 mm innerem, 190 mm äusserem Durchmesser und 34 mm Breite um eine in der Ebene der äusseren Rolle liegende Axe durch eine Triebvorrichtung mit Schwungrad 45 mal in der Secunde rotiren. Auf die Axe waren zwei mit den Enden der rotirenden Rolle verbundene und von einander isolirte Stahlcylinder aufgeschoben, gegen die zwei mit Platinblech belegte Stahlfedern schleiften. Durch die feste, äussere Rolle wurde der durch eine Sinusbussole gemessene inducirende Strom geleitet, welcher seine Intensität kaum änderte, mochte die rotirende Rolle geschlossen oder geöffnet sein oder still stehen. Die Widerstände der Drahtrollen, sowie die Erwärmungen beider Schliessungskreise wurden durch den Platindraht mit Thermoelement (vergl. den vorigen Paragraphen) bestimmt, nachdem die Rotation 30 Secunden gedauert hatte und darauf der Stromkreis der inducirenden Rolle während 20 Secunden geöffnet war.

Dabei ergab sich z. B.:

I	Erwärmung im inducirenden Kreise Inductionsspirale		Erwärmung im inducirten Kreise
	offen	geschlossen	
I. 0,608	166,6	166,9	12,8
II. 0,819	271,0	273,0	24,6

Es verhalten sich also auch, wie vorauszusehen, die Erwärmungen im inducirten Kreise etwa wie die Quadrate der Intensitäten des inducirenden Stromes.

170 Ist man auf irgend eine Art im Stande, die Intensität der Schliessungsextraströme in einem oft unterbrochenen Schliessungskreise zu vermindern, so wird die dabei entstehende Nebenarbeit kleiner, und es

wächst zu gleicher Zeit die mittlere Stromintensität im Schliessungskreise, so wie die während der Auflösung einer Gewichtseinheit Zink in der Säule in demselben erzeugte Wärmemenge.

So bestimmte Favre[1]) die Wärmemenge, welche in einer Säule von fünf Smee'schen Elementen entwickelt wurde, die sich in einem Calorimeter befand und entweder durch einen geraden Draht oder eine Spirale von gleichem Widerstand mit demselben geschlossen war, während der Strom oft unterbrochen wurde. Im letzteren Falle konnte ausser dem primären Strom fast nur der Schliessungsextrastrom durch den Schliessungskreis fliessen, da der Kreis bei der Bildung des Oeffnungsstromes unterbrochen war. Die während der Entwickelung von 1 g Wasserstoff erzeugte Wärmemenge W war kleiner, als die im ersten Fall entwickelte Wärme W_0. Wurde nun um die Spirale eine zweite, in sich geschlossene Spirale oder ein Blechcylinder gelegt, so wurde die Entstehung des Schliessungsextrastromes verzögert; die jetzt entwickelte Wärme W_1 war grösser als W. Zugleich war die an einer Tangentenbussole abgelesene mittlere Intensität des Stromes verstärkt. — Dasselbe Resultat haben auch Favre (l. c.), und nach ihm Soret[2]) beobachtet, als sie in den Schliessungskreis der inducirenden Spirale eines Ruhmkorff'schen Apparates eine Tangentenbussole einschalteten, und abwechselnd die Inductionsspirale öffneten und in sich schlossen. Diese Erscheinung hängt hier nicht nur von einer Verzögerung des Ganges des die Unterbrechungen herstellenden Hammerapparates und von der etwa dadurch erfolgenden längeren Schliessung des inducirenden Kreises ab; sie zeigt sich auch bei Herstellung der Unterbrechungen durch ein Uhrwerk. — Das analoge Resultat hat Soret erhalten, als er durch eine Tangentenbussole und eine einen Eisenkern enthaltende Drahtspirale einen durch ein Uhrwerk oft unterbrochenen Strom leitete und zwischen den Eisenkern und die Spirale eine in sich geschlossene Messingblechröhre schob. Auch hier nahm im letzteren Falle die Intensität des Stromes zu, obgleich durch die Inductionsströme die Blechhülle erwärmt, also durch den Strom eine äussere Arbeit geleistet wurde.

Durch die geschlossene Spirale oder die Blechhülle wird die Zeitdauer des Schliessungsextrastromes verlängert, seine Gesammtintensität in der Hauptspirale bleibt aber ungeändert[3]). Ist die Zeitdauer der Schliessungen derselben so kurz, dass der Extrastrom bei seiner Verzögerung in derselben nicht vollständig ablaufen kann, so wächst in dieser Zeit auch noch die Intensität des in der Nebenspirale inducirten und dem Extrastrom in der Hauptspirale gleich gerichteten Stro-

---

[1]) Favre, Compt. rend. 46, p. 662, 1858*; Favre und Laurent, ibid. 50, p. 651*; Archives des sc. phys. et nat. Nouv. Ser. 7, p. 313, 1860*. — [2]) Soret, Arch. Nouv. Ser. 4; p. 66, 1859*. — [3]) Eine irrige Vorstellung wäre es, wollte man annehmen, dass bei geschlossener Nebenspirale der Extrastrom sich weniger in der Hauptspirale, sondern hauptsächlich in der Nebenspirale ausbildete, also gewissermaassen sich auf letztere übertrüge.

mes an; durch seine inducirende Wirkung auf letztere erzeugt er in ihr einen dem Extrastrom entgegengesetzten Strom, und die Intensität des Hauptstromes vermindert sich weniger, sie erscheint grösser bei geschlossener, als bei offener Nebenspirale. Der zweite, entgegengesetzte Theil der Inductionswirkung des Stromes in der Nebenspirale auf die Hauptspirale kann hierbei weniger hervortreten, da beim allmählichen Abnehmen seiner Intensität die primäre Schliessung schon geöffnet ist. Um auf diese Weise eine gleiche Gesammtintensität des Hauptstromes bei wiederholten Unterbrechungen desselben zu erhalten, bedarf es bei geschlossener Nebenspirale einer kürzeren Zeit, als im entgegengesetzten Falle; die dabei in der Schliessung entwickelte Wärmemenge ist also im ersten Fall grösser als im zweiten, obgleich beide Male die in der Säule entwickelte Wasserstoffmenge dieselbe ist. — Je schneller die Unterbrechungen am Interruptor erfolgen, desto mehr muss der Einfluss der geschlossenen Spirale oder Blechhülle hervortreten, da dann immer kleinere Theile des Extrastromes sich von dem Hauptstrome subtrahiren. Ohne geschlossene Hülle nimmt die Verminderung des Hauptstromes mit wachsender Zahl der Unterbrechungen sehr bedeutend zu.

Wird in die primäre Spirale ein Eisen- oder ein Stahlkern eingeschoben, so zeigt sich bei einer gleichen Anzahl von Unterbrechungen an der Tangentenbussole eine geringere Intensität, in dem Calorimeter eine geringere Wärme im ersten, als im zweiten Falle [1]). Der Grund hiervon ist, dass die temporäre Magnetisirung des Stahles geringer ist, als die des Eisens, die Extraströme im ersteren Fall also schwächer auftreten und den primären Strom weniger schwächen als im letzteren. — In allen Fällen muss indess die gesammte Arbeitsleistung in allen Theilen des Apparates dem mechanischen Aequivalent der chemischen Processe in der Säule direct entsprechen.

171 Je schneller bei gleicher Gesammtintensität der Inductionsstrom verläuft, je grösser in jedem einzelnen Moment seine Intensität ist, desto grösser muss jene Wärmemenge ausfallen. Alle Ursachen, welche die Dauer der Inductionsströme vergrössern, müssen also ihre thermischen Wirkungen vermindern.

Abria [2]) umwand z. B. die Löthstelle eines Wismuth-Antimon-Thermoelementes mit vier bis fünf Windungen von $^1/_4$ mm dickem, übersponnenen Kupferdraht, deren Enden er in den Schliessungskreis einer Inductionsspirale einfügte. Durch einen Disjunctor konnte er durch jene Windungen einzeln die Inductionsströme leiten, welche entweder bei wiederholtem Oeffnen oder beim Schliessen einer inducirenden Spirale erzeugt worden waren.

Wurde in die Nähe der Inductionsspirale eine geschlossene Spirale

---

1) Favre und Laurent, l. c. — 2) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 7, p. 469, 1843*.

oder eine Metallplatte gebracht, so verminderte sich die Wärmewirkung der Inductionsströme, und zwar je nach der Grösse der Spirale oder Platte verschieden. Wurde die geschlossene Spirale oder Platte zwischen die primäre und die inducirte Spirale geschoben, so war die Schwächung stärker, als wenn sich die inducirte Spirale zwischen der geschlossenen und primären Spirale befand, da im ersteren Falle die in der geschlossenen Spirale inducirten Ströme, welche verzögernd auf die Ströme in der Inductionsspirale zurückwirken, eine grössere Intensität besitzen.

172 5. Die physiologischen Wirkungen der Ströme[1]), die durch dieselben bewirkten Zuckungen der Froschschenkel und die Erschütterungen, welche dem menschlichen Körper ertheilt werden, entsprechen der Aenderung, welche die Dichtigkeit der Ströme in der Zeiteinheit erfährt[2]). Wenn daher in einem Stromkreise ein Strom in einer sehr kurzen Zeit von Null auf das Maximum seiner Intensität ansteigt und von diesem Maximum wieder auf Null herabsinkt, so ist seine physiologische Wirkung viel bedeutender, als wenn er in längerer Zeit dieselbe Intensität erreicht und wieder verschwindet. Jede Ursache also, welche das Entstehen oder Vergehen eines Stromes in einem Schliessungskreise verzögert, schwächt seine Wirkung.

Dieser Satz gilt namentlich für die Inductionsströme, welche durch ihr schnelles Ansteigen und Verschwinden besonders geeignet sind, physiologische Wirkungen hervorzubringen. Es wiederholen sich daher hier für die Stärke der physiologischen Wirkungen bis zu einem gewissen Grade dieselben Bedingungen, wie für die Stärke der erwärmenden Wirkung der Inductionsströme.

Da indess die thermische Wirkung von dem Verlaufe des Stromes doch in anderer Weise abhängt, als die physiologische, so gehen sie nicht vollständig einander parallel. So wird auch, wenn z. B. die doppelte Elektricitätsmenge mit halber Dichtigkeit aus einer grösseren Batterie entladen wird, die thermische Wirkung die gleiche, wie wenn die einfache Elektricitätsmenge mit einfacher Dichtigkeit entladen wird; die physiologische Wirkung ist im ersten Falle aber grösser.

173 Umgiebt man eine inducirende Spirale mit einer Inductionsspirale, schliesst die letztere vermittelst zweier, an ihren Enden angebrachter Handhaben durch den menschlichen Körper, und unterbricht den inducirenden Strom, indem man eine Metallspitze, welche mit dem einen Ende der Leitung desselben verbunden ist, aus einem mit dem anderen Ende der Leitung verbundenen Quecksilbernapf heraushebt, so ist die Erschütterung, welche der dabei erzeugte Inductionsstrom im Körper hervorruft,

---

[1]) Wir betrachten diese Wirkungen nur insoweit, als sie zur Ergründung der physikalischen Verhältnisse der Inductionsströme dienen. — [2]) E. du Bois-Reymond, Untersuchungen, 1, p. 258, 1848*.

um so schwächer, je langsamer man die Spitze hebt, da dann die Intensität des inducirenden Stromes schon vor der vollständigen Unterbrechung allmählich bedeutend vermindert worden ist.

Verbindet man die Inductionsspirale mit dem menschlichen Körper, löst durch eine Wippe die primäre Spirale von der Säule und unterbricht unmittelbar nachher durch dieselbe Wippe die Verbindung der Inductionsspirale mit dem Körper, so ist die physiologische Wirkung die gleiche, wie bei längerer Verbindung. Es ist dies ein doppelter Beweis; einmal dafür, dass der Inductionsstrom schneller bis zum Maximum ansteigt, als der kurze Zwischenraum zwischen den beiden, durch die Wippe hergestellten Unterbrechungen dauert; sodann, dass die Wirkung des zweiten Theiles des Inductionsstromes, während dessen seine Intensität abnimmt, viel schwächer ist, als die des ersten Theiles, während dessen seine Intensität ansteigt [in Folge des viel langsameren Verlaufes des zweiten Theiles [1]), vergl. §. 137].

Wird die inducirende Spirale abwechselnd geöffnet und geschlossen, so hat der Oeffnungsinductionsstrom bei gleicher Gesammtintensität doch im Allgemeinen einen viel schnelleren Verlauf als der Schliessungsinductionsstrom; die durch ersteren hervorgerufenen Erschütterungen sind bedeutender, als die durch den Schliessungsstrom.

Sehr gut lassen sich die abwechselnden Erschütterungen durch den Schliessungs- und Oeffnungsinductionsstrom vermittelst des Fig. 4, §. 5 abgebildeten Schlittenapparates hervorbringen.

174 In Folge der tertiären Ströme, welche in der primären Spirale nach ihrer Schliessung durch den Inductionsstrom der secundären Spirale inducirt werden, treten bei diesen Versuchen besondere Umstände ein, welche namentlich Henry [2]) beobachtet hat.

Durch eine Bandspirale von 60 Fuss Länge wurde der Strom eines einzelnen Daniell'schen Elementes geleitet und abwechselnd mittelst eines Quecksilbernapfes geöffnet und geschlossen. Auf die Spirale wurde eine zweite Inductionsspirale von dünnem Kupferdraht von 1660 Yards (1518 m) Länge gelegt, deren Enden durch Handhaben mit dem Körper verbunden wurden. Der Oeffnungsschlag war hier stark, der Schliessungsschlag schwach. Mit wachsender Elementenzahl wuchs der Schliessungsschlag, der Oeffnungsschlag änderte sich wenig. Bei 30 Elementen soll der erstere Schlag der stärkere gewesen sein. — Durch die Zahl der Elemente wird der Widerstand des primären Kreises zugleich mit der elektromotorischen Kraft darin vermehrt. Würde die Intensität des Stromes in ihm, nachdem sie constant geworden, ungeändert bleiben, so würde der beim Schliessen des Kreises in der eingeschalteten Spirale inducirte Extrastrom doch mit zunehmendem Wider-

---

[1]) Helmholtz, Pogg. Ann. **83**, p. 538, 1851*. — [2]) Henry, Phil. Mag. [3] **18**, p. 482, 1841*; Pogg. Ann. **54**, p. 84*.

stande eine schwächere Intensität besitzen. Der primäre Strom würde schneller zum Maximum seiner Intensität anwachsen und ebenso auch der Schliessungsinductionsstrom in der benachbarten Inductionsspirale in kürzerer Zeit, aber mit grösserer Intensität verlaufen, also stärkere physiologische Wirkungen hervorbringen. Auf den Oeffnungsstrom hat dagegen dieselbe Veränderung des primären Schliessungskreises einen geringeren Einfluss, da er in demselben weniger zu Stande kommt, indem der Kreis beim Entstehen desselben geöffnet ist.

Wird die Zahl der Windungen der inducirenden Spirale vermindert (ihr Potential auf sich selbst also kleiner), so nimmt bei gleicher Intensität des inducirenden Stromes die elektromotorische Kraft und Intensität des Extrastromes in ihr ab, und daher verläuft wiederum der secundäre Strom in der Inductionsspirale bei der Schliessung schneller; seine physiologische Wirkung ist nicht mehr so sehr viel geringer als die des Oeffnungsstromes, wie bei Anwendung einer mehrfach gewundenen Spirale.

175 Diese Ungleichheit des Verlaufes und der physiologischen Wirkungen des Oeffnungs- und Schliessungsinductionsstromes fällt zum grossen Theil fort, wenn man den Strom, statt allein durch die inducirende Rolle, noch durch eine Nebenschliessung zu derselben leitet, und diese abwechselnd schliesst und unterbricht. Dann finden die Inductionsströme, welche bei der abwechselnden Steigerung und Abnahme der Intensität des primären Stromes in der inducirenden Rolle selbst erzeugt werden, in allen Fällen eine geschlossene Bahn; ihr Verlauf ist sowohl beim Schliessen wie beim Oeffnen der Nebenleitung nicht allzu sehr verschieden. Namentlich wenn der Widerstand der Nebenschliessung gegen den Widerstand des die Säule enthaltenden Schliessungszweiges, letzterer gegen den Widerstand der inducirenden Rolle klein ist, wird der Verlauf der Inductionsströme nahezu gleich.

So beobachtete Henry, als er die beiden Enden des Drahtes einer Drahtrolle in zwei mit den Polen einer Säule verbundene Quecksilbernäpfe tauchte, sodann etwa 6 Zoll von dem einen Quecksilbernapf entfernt in den Draht eine hakenförmige Biegung machte und diese abwechselnd in den anderen Quecksilbernapf tauchte und aus demselben herausnahm, dass er von einer der Drahtrolle benachbarten Inductionsrolle in beiden Fällen keine Erschütterungen erhielt, wohl weil sowohl beim Eintauchen, als auch beim Herausziehen des Hakens die in der primären Rolle entstehenden Inductionsströme zu sehr den Inductionsstrom verzögerten, als dass man seine physiologische Wirkung hätte wahrnehmen können[1]).

Diese Resultate stimmen mit den Berechnungen von E. du Bois-Reymond (§. 140 und 141) vollkommen überein.

[1]) Henry, Pogg. Ann. 54, p. 87, 1841*.

176 Will man den du Bois'schen Schlittenapparat unter Anwendung einer Nebenschliessung zur Erzeugung von gleichmässig verlaufenden Schliessungs- und Oeffnungsinductionsströmen verwenden, so ändert man den stromunterbrechenden Theil desselben, nach Helmholtz[1]), in folgender Art ab.

Der eine Pol der Säule K, Fig. 56, wird mit der, die schwingende Feder oo des Wagner'schen Hammers tragenden Messingsäule d verbunden. Von dieser Säule führt vermittelst der Klemmschraube α eine Drahtverbindung direct zu dem einen Ende y der inducirenden Drahtrolle A. Das andere Ende x derselben ist in Verbindung mit den Umwindungen des Elektromagnetes M, welcher sich unter dem vorderen, den Anker tragenden Ende der Feder oo befindet. Das andere Ende der Umwindungen ist mit der Messingsäule Z, und diese wiederum mit dem zweiten Pole der Säule K verbunden. Oben trägt die Säule S eine Messingschraube, die oberhalb in eine Platinspitze endigt. Ihr gegenüber ist unterhalb an der Feder oo ein Platinplättchen r angelöthet. — Der den Kreis $K \alpha \beta y A x M K$ durchfliessende Strom erregt den Magnet M, welcher seinen Anker und die Feder oo herunterzieht, so dass das Plättchen r gegen die Platinspitze der Schraube S gegenschlägt. Dadurch ist eine Nebenleitung geschlossen, welche aus den Säulen d und Z und dem hinteren Theile der Feder oo besteht.

Fig. 56.

Der Strom in dem erst erwähnten Theile der Schliessung wird hierdurch so geschwächt, dass der Magnet M den Anker loslässt, die Feder oo zurückschnellt, und so die Nebenleitung geöffnet wird u. s. f.

Will man den Apparat auch ohne Nebenschliessung auf die früher (§. 5) angegebene Art verwenden können, so befestigt man auf der Feder oo auch oberhalb ein Platinplättchen p und stellt demselben, wie auch in Fig. 56 in punktirter Zeichnung angegeben ist, von oben eine Schraube Q mit Platinspitze gegenüber, welche direct mit dem Ende y der inducirenden Spirale verbunden ist. Die Schraube Q ist bei An-

[1]) Vergleiche E. du Bois-Reymond, Monatsber. der Berliner Akademie, 26. Juni 1862*. Wundt, du Bois u. Reichert's Archiv 1859, p. 538 u. 550*.

wendung der Nebenschliessung in die Höhe geschraubt. Schraubt man sie herunter, dass die Feder *oo* in der Ruhelage gegen sie gegendrückt, senkt die Schraube *S* so weit, dass die Feder bei ihren Schwingungen sie nicht mehr berührt, und entfernt endlich den Draht β, so entspricht der Apparat völlig der Fig. 4, §. 5 gezeichneten Einrichtung.

177 Die Nähe geschlossener metallischer Leitungen kann gleichfalls die physiologischen Wirkungen der Inductionsströme ändern. So legte Henry (l. c.) auf seine Inductionsrolle von 1660 Yards Kupferdraht ein Gewinde von nur drei Windungen Kupferband und leitete durch letzteres einen Strom. Die durch die Inductionsrolle erzeugten Oeffnungs- und Schliessungsschläge waren gleich fühlbar. Nun wurde eine Bandspirale *A* von 60 Fuss Länge in den Schliessungskreis der Kette eingeschaltet, so dass sie nicht inducirend wirken konnte. Der Schliessungsschlag war kaum wahrnehmbar, der Oeffnungsschlag war nicht vermindert. Wurde jetzt in die Spirale *A* eine zweite gleiche Spirale *B* so eingelegt, dass ihre Windungen denen der ersteren parallel waren, so blieben die Erscheinungen ungeändert, so lange *B* geöffnet war. Wurde sie aber in sich geschlossen, so war der Schliessungsschlag fast eben so stark, wie ohne Anwendung der Spirale *A*. Der Oeffnungsschlag war wenig geändert. — Der Grund hiervon ergiebt sich aus §. 135. Bei der Schliessung des primären Kreises wächst der inducirende Strom anfangs schneller an, wenn die Spirale *B* in sich geschlossen ist, als im gegentheiligen Falle. Die physiologische Wirkung des Inductionsstromes in der Inductionsspirale ist stärker. Die später erfolgende Verzögerung des Anwachsens des primären Stromes bis zu seinem völligen Maximum vermag nicht eine so grosse Verminderung der physiologischen Wirkung des secundären Stromes zu bewirken, wie dieselbe durch das anfängliche schnellere Ansteigen des primären Stromes gesteigert wird.

Stellt man ferner zwei Bandspiralen *A* und *B* parallel einander gegenüber, verbindet die Enden der einen durch zwei Handhaben mit den Händen und leitet durch die andere einen Strom, den man nachher öffnet, so erhält man eine Erschütterung, welche nicht geschwächt wird, wenn man zwischen die Spiralen schlechte Leiter, z. B. Holzplatten, einschaltet. Schiebt man aber zwischen dieselben ein nicht zu dünnes Blech von Kupfer oder Messing, so wird die physiologische Wirkung bedeutend vermindert. Dasselbe geschieht, wenn zwischen die Spiralen eine dritte, in sich geschlossene Spirale gestellt wird. Je geringer der Widerstand des Schliessungskreises der letzteren ist, desto grösser ist die Schwächung; also ist sie bedeutender, wenn die Schliessung durch einen Metalldraht, als wenn sie durch eine ihm an Länge gleiche Wassersäule geschieht.

Stellt man zwischen die inducirende und die inducirte Spirale *A* und *B* eine Metallplatte, welche mit einem radialen Einschnitt versehen ist, so können in derselben keine Inductionsströme entstehen; ihr Einfluss auf

die physiologische Wirkung der in *B* inducirten Ströme verschwindet. Verbindet man aber die beiden Ränder des Einschnittes der Metallplatte mit einem Galvanometer oder mit einer kleinen Magnetisirungsspirale, in welche man eine Stahlnadel einlegt, so zeigt die Ablenkung der Magnetnadel des ersteren, sowie die Magnetisirung der letzteren beim Oeffnen des Stromkreises der Spirale *A* an, dass in der Platte ein Strom entstanden ist, welcher dem primären Strom in der inducirenden Spirale gleichgerichtet ist, also durch Induction von Strömen höherer Ordnung in Spirale *B* die direct in ihr erzeugten Inductionsströme verzögern kann.

Wendet man an Stelle der Bandspiralen eine gewöhnliche cylindrische Spirale von dickerem Draht an, durch welche man einen Strom leitet, und welche mit einer Inductionsspirale von langem, dünnem Draht umgeben ist, so werden die durch den Inductionsstrom in letzterer bei öfterer Unterbrechung des inducirenden Stromes erzeugten Erschütterungen gleichfalls durch Zwischenschieben eines in sich geschlossenen Cylinders von Kupfer- oder Messingblech geschwächt. Dieser Vorrichtung bedient man sich zuweilen bei den zu medicinischen Zwecken dienenden Inductionsapparaten, um durch mehr oder weniger weites Zwischenschieben des Blechcylinders zwischen die, durch einen Wagner'schen Hammer mit der Säule verbundene inducirende und die inducirte Spirale die Intensität der physiologischen Wirkung zu reguliren. — Ist der Blechcylinder der Länge nach aufgeschlitzt, so bietet er den Inductionsströmen keine geschlossene Bahn und hemmt die physiologische Wirkung nicht.

178 Aehnliche Versuche, namentlich auch über die Einwirkung von Eisencylindern, welche zwischen die inducirende und Inductionsspirale gebracht werden, sind von Villari[1]) angestellt worden. Die 15 cm lange, inducirende Spirale des du Bois'schen Schlittenapparates wurde mit einem Daniell'schen Element verbunden und an einer Stelle der Schliessung ein Quecksilbernapf eingefügt, um den Stromkreis leicht öffnen und schliessen zu können. Die inducirte Spirale war mit einem Froschpräparat verbunden. Ueber die inducirende Spirale wurden verschiedene Blechcylinder geschoben und der Abstand *a* der einander zugekehrten Enden beider Spiralen gemessen, bei welchen das Froschpräparat noch merklich zuckte. *a* ist positiv, wenn die Spiralen dabei über einander geschoben werden müssen.

Bei Verlängerung der Röhren vermehrt sich die Wirkung derselben, so dass Villari bis zu 50 cm lange Röhren verwendete.

Die Dicke der Röhren ist nicht von sehr grossem Einfluss. Es wurden deshalb dünne Blechröhren verwendet. Bei zwei Versuchsreihen mit 50 cm langen Röhren ergab sich der Abstand *a*:

---

[1]) Villari, Rendiconto del Istituto Lombardo, 1869, 15. April; 1870, 29. December*.

	Eisen		Kupfer		Zink	
	I	II	I	II	I	II
Spirale allein . . .	— 68	— 41	— 55	— 42	— 48	— 39
Röhre geschlossen .	— 118	— 80	— 17	— 10	— 25	— 18
Röhre offen . . .	— 192	— 168	— 112	— 101	— 92	— 85

Die geschlossene Kupferröhre vermindert also die Inductionswirkung mehr als die Zinkröhre, offenbar in Folge der besseren Leitungsfähigkeit. Die Eisenröhre vermehrt aber die Wirkung. Die offenen Röhren vermehren die Wirkung in allen Fällen. Wurde die Kupferröhre durch vier von einander getrennte, auf einen Holzcylinder parallel neben einander geklebte Kupferstreifen ersetzt, so war die Wirkung fast Null; war sie aus einem unter Zwischenlegung eines Papierblattes zweimal über einander gewundenen Kupferblech gebildet, so war die Wirkung sehr bedeutend. Hier entstehen in den über der inducirenden Spirale befindlichen Theilen der Röhren Ströme, welche sich, wenn die Röhren geschlossen sind, in sich ausgleichen. Ist die Röhre aber offen und verhältnissmässig lang, so gleichen sich diese Ströme in den von der inducirenden Spirale entfernteren Theilen der Röhre aus und erzeugen so in denselben Ströme, welche den über der Spirale verlaufenden entgegengerichtet sind. Diese Ströme bedingen dann in der Inductionsspirale bei ihrem Entstehen Ströme, welche den durch die inducirende Spirale hervorgerufenen gleich gerichtet sind und sie verstärken.

Durch Anlegen der amalgamirten Enden der zu einem Galvanometer führenden Drähte an verschiedene Stellen der Kanten der offenen Röhren kann man direct diese Stromesrichtungen nachweisen. Selbstverständlich hat die Einschaltung der Röhren auf die galvanometrische Wirkung der Inductionsströme keinen Einfluss.

Ist die Inductionsspirale ganz über die inducirende geschoben, und wird in den Schliessungskreis der inducirten ein so grosser Widerstand w eingeschaltet, dass nur gerade noch das Froschpräparat in der Schliessung der Inductionsspirale eine Wirkung angiebt, so muss bei Zwischenlegung der Röhren zwischen beide Spiralen der Widerstand w in allen Fällen vermindert werden, um wieder eine Zuckung hervorzubringen. Die Röhren schwächen also stets die Wirkung. So ergab sich für w:

	Eisen		Kupfer	
	I	II	I	II
Spirale allein	178	103	—	—
Röhre geschlossen . .	67	32	77	44
Röhre offen	122	69	165	84

Die Eisenröhre schwächt also viel stärker, indem die in ihr erzeugten Inductionsströme sie zugleich magnetisiren. Die offenen Röhren wirken selbstverständlich schwächer als die geschlossenen.

179 Da Metallmassen ganz dieselbe verzögernde Wirkung auf die Bildung der Extraströme ausüben, wie auf die Bildung der anderen Inductionsströme, so wird auch durch ihre Nähe die physiologische Wirkung der Extraströme geschwächt. Verbindet man die Enden einer Inductionsrolle von langem dünnen Draht direct mit den Polen der Säule und bringt an irgend einer Stelle des Schliessungskreises vermittelst eines Quecksilbernapfes eine Unterbrechungsstelle an, an deren beiden Seiten Handhaben an den Leitungsdrähten befestigt sind, die man mit den Händen ergreift, so erhält man beim Oeffnen der Verbindung mit der Säule einen stärkeren Schlag, wenn sich in der Spirale kein Metallcylinder befindet, als wenn man einen solchen in die Spirale einschiebt. — Ist die Spirale mit einer zweiten Spirale umgeben, so ändert diese die physiologische Wirkung des Extrastromes nicht, wenn ihre Enden nicht verbunden sind, sie schwächt sie wenig, wenn die Enden durch eine lange Wassersäule, stark dagegen, wenn sie durch einen guten Leiter verbunden sind u. s. f.[1]).

Die Einflüsse der Inductionsströme auf die temporäre und permanente Magnetisirung, ebenso die Funkenentladung derselben bei einer Unterbrechung ihrer Schliessung durch eine Gasschicht werden wir in einem besonderen Abschnitte behandeln.

II. Induction bei Entladung eines Condensators.

a) Extraströme im Schliessungskreise eines Condensators. Oscillirende Entladung.

180 Wird ein Condensator, resp. ein einfacher Conductor durch einen Schliessungskreis entladen, in welchem einzelne Theile der Leitung parallel neben einander liegen, sind z. B. Spiralen in den Schliessungskreis eingefügt, so finden auch hier Inductionswirkungen statt. Zunächst bilden sich beim Entstehen der Entladungsströme des Condensators entgegengerichtete Extraströme, sodann beim Verschwinden derselben ihm gleichgerichtete Extraströme.

Wir werden später sehen, dass durch die Extraströme der Condensator von Neuem in entgegengesetzter Richtung geladen werden kann, welche Ladung eine wiederholte Entladung zur Folge hat, so dass der Condensator selbst auf diese Weise nach einander abwechselnde Ladungen zeigt, die Richtung der Ströme in dem Schliessungskreise also mehrere Male „oscillatorisch“ abwechseln kann.

---

[1]) Vergl. auch Masson und Breguet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 4, p. 129, 1842*.

181 Zum Nachweis der Extraströme bei der Entladung statischer Elektricität verband Buff [1]) eine Drahtspirale S einerseits mit einer Metallkugel C, anderseits mit dem negativen Conductor E. Zur Spirale wurde eine Nebenleitung $DGNF$ hergestellt, welche bei G ein Galvanometer, vor demselben als Nebenschliessung ein Funkenmikrometer M, und bei N noch ein Funkenmikrometer enthielt. Wurde C direct mit dem Conductor A der Elektrisirmaschine verbunden, das Funkenmikrometer M geöffnet, N geschlossen, so zeigte sich bei Erregung der Maschine nur ein schwacher Ausschlag des Galvanometers, welcher ein wenig stieg, als vom Conductor Funken auf C übergingen. Wurden aber die Kugeln von M einander genähert, so dass zwischen ihnen Funken überschlugen, so erschien ein stärkerer Ausschlag. — Wurden die Kugeln von M weit von einander gestellt, dass kein Funken überging, dagegen die von N einander so weit genähert, dass sich kleine Funken zeigten, so war der nun erfolgende Ausschlag entgegengesetzt und zwar mit wachsendem Abstand von C vom Conductor grösser.

Fig. 57.

Der Multiplicator hatte so wenige Windungen, dass die Induction von Extraströmen in ihm zu vernachlässigen war. Der sich in C zwischen den Zweigen FSD und $FN(MG)D$ theilende Hauptstrom hat hier wenig Einfluss auf die Galvanometernadel; die in S inducirten Extraströme verlaufen im Kreise $SD(MG)NF$. Ist N geschlossen, M geöffnet, so vermag der dichtere von ihnen, welcher in S dem Hauptstrome gleich, in $D(MG)NF$ entgegengerichtet ist, die Funkenstrecke M zu durchbrechen, der dem Hauptstrome in $D(MG)NF$ gleichgerichtete bringt die Nadel stärker zur Ablenkung. Ist dagegen N geöffnet, die Funkenstrecke M entfernt, so wird N nur von dem dem Hauptstrom in $DGNF$ entgegengerichteten Strom durchbrochen, welcher die Nadel ablenkt.

182 In anderer Art ist dieser Nachweis von Riess [2]) mittelst des sogenannten elektrischen Ventils geführt worden.

Dasselbe besteht aus einem 100 mm hohen und 40 mm weiten, beiderseits offenen Glascylinder, auf dessen eines Ende eine Messingplatte gekittet ist, welche im Inneren des Cylinders eine Messingröhre trägt. In dieselbe kann man einen Draht schrauben, welcher in einer Messingkugel von 10 mm Durchmesser oder einer Platte endet. Das andere Ende des Glascylinders ist mit einer Glasplatte bedeckt, in die in der

[1]) Buff, Ann. d. Chem. u. Pharm. **86**, p. 306, 1853*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. **96**, p. 179, 1855*; Monatsber. d. Berl. Akad. 1855, p. 393*; Abh. **1**, p. 133*; siehe auch Knochenhauer, Pogg. Ann. **129**, p. 78, 1866*.

Mitte eine 0,5 mm dicker Platindraht eingekittet ist, welcher auf der dem inneren Raume des Cylinders zugekehrten Seite zugleich mit der Glasplatte abgeschliffen ist. Die Luft im Cylinder wird durch einen an der Messingplatte befestigten Hahn bis auf 2 bis 3 mm Quecksilberdruck ausgepumpt. Schaltet man ein solches Ventil in den Schliessungskreis von abwechselnd gerichteten Inductionsströmen ein, so gehen bei nicht zu grosser Dichtigkeit derselben und geeigneter Verdünnung der Luft nur diejenigen hindurch, für welche die Messingplatte als positive Elektrode dient (siehe im Capitel Funkenentladung).

Bringt man das Ventil in den Schliessungskreis einer Leydener Batterie, in welchen noch eine Spirale eingefügt ist, so bleibt freilich die Ablenkung der Galvanometernadel bei beiden Stellungen des Ventils gleich gerichtet, auch ist die Ablenkung nicht wesentlich verschieden, mag das Ventil seine Fläche oder seine Spitze der inneren positiven Belegung der Batterie zukehren, da gegen die grosse durch das Ventil entladene gesammte Elektricitätsmenge der Batterie die kleine im Extrastrom bewegte, vom Ventil in der einen oder anderen Richtung hindurchgelassene zu sehr zurücktritt.

Die Wirkung der Extrainduction zeigt sich, wenn man die Wirkung der Hauptströme auf die Nadel beseitigt. **183**

Hierzu kann man den Strom der Batterie nach Feddersen[1]) durch die beiden mit kautschuküberzogenen drahtumwundenen und symmetrisch zum Magnetspiegel aufgestellten Rollen eines Spiegelgalvanometers in entgegengesetzter Richtung leiten, so dass die Ablenkung des Spie-

Fig. 58.

gels der Differenz der Drehungsmomente beider Rollen entspricht, resp. Null ist. In beide Zweige werden nahe der Eintrittsstelle des Hauptstromes zwei Ventile in entgegengesetzter Richtung eingeschaltet, oder statt derselben wird der Strom durch das von Feddersen angegebene Doppelventil, Fig. 58, geleitet.

Ein Glascylinder ist auf der einen Seite durch eine Glasplatte, in welche mittelst einer Stopfbüchse ein innen zugespitzter Metallstab *d* eingesetzt ist, auf der anderen durch eine Metallfassung geschlossen, durch

[1]) Feddersen, Ber. d. K. Sächs. Ges. 1861, p. 114*; Pogg. Ann. 115, p. 336, 1862*.

welche in einer Stopfbüchse ein Metallstab geht, der innerhalb eine kreisförmige, zum Cylinder conaxiale Metallplatte *g* trägt. An der Metallfassung ist ein mit der Luftpumpe verbundener Hahn und ein Manometer befestigt. In der Mitte ist die Röhre von einem Tubulus *q* durchbohrt, durch den ein Metallstab hindurchgeht, welcher im Rohr eine demselben conaxiale Metallplatte *c* trägt, von der ebenfalls conaxial gegen die schon erwähnte Metallplatte *g* eine Spitze *h* hinläuft.

Man leitet den Batteriestrom von der Mitte des Doppelventils zu beiden Enden, von letzteren zu den entgegengesetzt gestellten Galvanometerrollen und von diesen zur Erde oder der äusseren Belegung. Dabei erhält man eine bedeutende Ablenkung (*C*) am Galvanometer, welche einem positiven Strome von der inneren positiven Belegung der Batterie von der Fläche zur Spitze des Ventils entspricht. Sie ist vielmal grösser, als wenn der ganze Strom von Fläche zur Spitze allein überginge und dabei beide Galvanometerrollen in gleichem Sinne durchliefe (*A*).

Der Ausschlag *C* nimmt mit der Steigerung der Luftverdünnung zu und ist ziemlich unabhängig von kleinen Aenderungen des Abstandes der Platten und Spitzen im Ventil. Er steigt langsam mit der Grösse der Batterie, der Schlagweite und nimmt ab bei wachsendem Widerstand, so dass bei einem bestimmten Grenzwiderstand (s. w. u.) der Ausschlag kleiner wird, als bei ungetheiltem Stromeslauf im Galvanometer ($C < A$). Bei noch grösserem Widerstand wird der Ausschlag wechselnd und unbestimmt.

Werden Flüssigkeiten zwischen Fläche und Spitze eingeschaltet, so ergeben sich ebenfalls bei gut leitenden Schliessungsbogen mehrfach grössere Ausschläge *C* als *A*. Mit abnehmendem Leitungsvermögen der Flüssigkeit erscheint der Funken stärker und der Ausschlag grösser.

184 Das Analoge ergiebt sich nach Riess[1]), wenn man die eine der Spiralen I nahe dem Spiegel lässt, die andere II aber so weit entfernt, dass derselbe nicht mehr von ihr beeinflusst wird. Dann ist bei völlig metallischer Schliessung die Ablenkung relativ klein (+ 3 bis 4 Scalentheile). Ist das Ventil in dem die Spirale I enthaltenden Zweige mit seiner Fläche der inneren positiven Belegung der Batterie, mit seiner Spitze der Spirale zugekehrt, in „Flächenstellung", das Ventil in dem Zweige der Spirale II entgegengesetzt in „Spitzenstellung", so ist die Ablenkung sehr bedeutend (+ 92 bis + 95 Scalentheile), ist die Stellung der Ventile die umgekehrte, so ist sie kleiner (— 75 bis — 82).

Ist das Ventil in dem Spirale I enthaltenden Zweige in Flächenstellung, so durchfliesst der Batteriestrom diesen Zweig leichter, als den anderen, so dass eine stärkere Ablenkung erfolgt. Wird in den Spiralen I und II dabei ein Inductionsstrom erzeugt, so durchfliesst auch dieser den durch die beiden Spiralen gebildeten Kreis in derselben Richtung, da für

---

1) Riess, Pogg. Ann. **120**, p. 533, 1863*; Abhandl. **1**, p. 330*.

ihn jetzt beide Ventile gleich gestellt sind. Ist aber das Ventil im Kreise der Spirale II in Flächenstellung, so dass durch diese Spirale der grösste Antheil des Hauptstromes geht, so fliesst überwiegend nur derjenige Antheil des in derselben Spirale erzeugten Inductionsstromes durch den Kreis der beiden Spiralen, welcher von den Flächen der Ventile zu den Spitzen gerichtet ist, aber in Spirale I der Richtung des Hauptstromes entgegengerichtet ist. Die Ablenkung erfolgt also im entgegengesetzten Sinne als vorher, aber wegen der Gegenwirkung des restirenden kleinen Antheils des Hauptstromes schwächer als im ersten Falle [1]).

Wird in beide Parallelzweige ein gleicher Widerstand eingeschaltet, so ändert dies die Verzweigung und die durch jeden Zweig hindurchgehende Elektricitätsmenge des Hauptstromes nicht, wohl aber wird der in den Spiralen erzeugte Inductionsstrom verzögert; daher werden die positiven und negativen Ablenkungen bei Einfügung der Ventile wesentlich verkleinert.

185 Lässt man in dem die Spirale II enthaltenden Zweige das Ventil fort, so durchfliesst der Batteriestrom in allen Fällen überwiegend diesen Zweig, und von den in demselben inducirten Strömen gehen je nach der einen oder anderen Stellung des Ventils im Zweige der Spirale I nur die nach der einen oder anderen Seite gerichteten Antheile durch letztere Spirale. Man kann auch hier zeigen, dass eine Einfügung von Widerständen in den Zweig mit Spirale I den Nebenstrom verzögert und die positiven und negativen Ablenkungen je nach der Stellung des Ventils kleiner werden.

Ersetzt man die vom Spiegel abgelegene Rolle II durch einen Platindraht, so ist das Verhalten noch ein ganz gleiches, nur ist die Ablenkung bei Flächenstellung des Ventils im Kreise der Spirale I kleiner (40 gegen 4 bei ganz metallischer Schliessung), da jetzt der Inductionsstrom in der Spirale II fortfällt; bei der Spitzenstellung ist der Ausschlag viel geringer (— 18 bis — 19) und fällt zuweilen ganz fort.

186 Je grösser das Potential der in die Leitung eingefügten Spirale II auf sich selbst ist, desto grösser ist diese Wirkung; wird die Spirale durch einen geraden Draht ersetzt, dessen zwei Hälften parallel in entgegengesetzten Richtungen vom Strom durchflossen sind, so ist deshalb im ersten Falle je nach der Stellung des Ventils die Ablenkung weniger vermindert oder vermehrt als bei Anwendung der Spirale.

Die Annäherung einer geschlossenen Spirale oder in sich geschlossener Metallhüllen u. s. f. an Spirale II bewirkt eine entsprechende Verzögerung und Verminderung der Ablenkung durch den Strom in der Spirale I [2]).

---

[1]) Riess, Abh. 1, p. 334*; Pogg. Ann. 121, p. 613, 1864*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 120, p. 513, 1863*; Abh. 1, p. 353 u. s. f.*

187 Mittelst des Extrastromes in dem Hauptkreise der Batterie kann man auch einen Condensator laden.

Man macht den Hauptkreis kurz und schliesst eine Drahtrolle ein, deren eines Ende mit der Condensatorplatte, deren anderes unter Zwischenfügung eines Ventils und eines Funkenmikrometers mit zwei $^1/_{10}'''$ von einander entfernten Kegelspitzen mit der Collectorplatte verbunden ist. Riess[1]) wendet hierbei eine Batterie von 3 Flaschen von 2,6 Quadratfuss Belegung, eine Spirale von 32 Windungen (30 Fuss Drahtlänge), und den Bd. I, §. 145 beschriebenen Condensator an. Nach der Entladung und Trennung der Condensatorplatten zeigt die Collectorplatte am Elektroskop Ladungen. Gleichgültig, mit welchem Ende der Drahtrolle diese Verbindung vorgenommen ist, stets wird bei positiver Ladung der Batterie die Collectorplatte positiv geladen, wenn ihr die Fläche, negativ, wenn ihr die Spitze des Ventils zugekehrt ist.

188 Bringt man in den Schliessungskreis der Batterie zwei Spiralen von genügender Länge und beobachtet die Erwärmung eines in denselben eingeschalteten Luftthermometers, so ist sie kleiner, wenn die Spiralen in gleichem, grösser, wenn sie in entgegengesetztem Sinne verbunden einander gegenüber gestellt werden[2]).

Bei gleicher Ladung der Batterie muss zwar in beiden Fällen die gesammte im Schliessungskreise erzeugte Wärmemenge dem Potential der Elektricitäten auf einander entsprechend die gleiche sein; indess vertheilt sie sich verschieden. Liegen die Spiralen gleichgerichtet, so erzeugt der in jeder einzelnen entstehende Entladungsstrom beim Entstehen eine ihm selbst entgegengerichtete Strömung in der anderen und umgekehrt beim Verschwinden. Liegen die Spiralen entgegengerichtet, so tritt das Gegentheil ein. Hierdurch wird der Verlauf des Abfalls der Potentiale der freien Elektricitäten auf dem Entladungskreise auf den einzelnen Stellen ausserhalb der Spiralen verändert und eine andere Wärmevertheilung kann eintreten, als ohne die Inductionswirkung[3]).

189 Bei diesen allgemeineren Versuchen tritt der eigenthümliche, schon §. 180 hervorgehobene Umstand noch nicht zum Vorschein, dass durch die Extraströme in dem Entladungskreise mehrfach abwechselnd gerichtete Elektricitätsströmungen veranlasst werden können, wodurch die Batterie abwechselnd entgegengesetzt geladen werden kann. Durch die später zu erwähnenden Versuche wird es wahrscheinlich, dass bei den meisten der früheren Versuche derartige oscillatorische Entladungen auftraten, so dass sich einfache Resultate nicht ergeben konnten.

---

[1]) Riess, Berl. Monatsber. 1865, p. 397*; Abhandl. 1, p. 370*; Pogg. Ann. 126, p. 583, 1865*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 81, p. 428, 1850*; Reibungselektricität 2, p. 312*. — [3]) Ueber die Untersuchung der Batterieentladung durch die Wärmeerzeugung und die Ablenkung der Magnetnadel u. s. f., siehe auch Riess, Berl. Monatsber. 1860, p. 5*; Pogg. Ann. 109, p. 545, 1860*; Abh. 1, p. 87*.

Bereits **Helmholtz**[1]) hatte die Entladung der Batterie als ein Hin- und Herschwanken der Elektricität zwischen beiden Belegungen aufgefasst, wobei die lebendige Kraft der Elektricität sich allmählich in Wärmebewegung umsetzt.

190 Schon im Jahre 1848 entlud **Maas**[2]) eine innen positiv geladene Leydener Flasche und näherte sie darauf einem negativ geladenen Elektroskop, dessen Goldblättchen dabei weiter ausschlugen. Nach einiger Zeit wurde die Ladung der Flasche wieder positiv. Nach einer zweiten Entladung trat die negative Ladung wieder hervor u. s. f. Je schwächer die restirende Ladung war, desto langsamer zeigte sich nach der negativen die positive Ladung wieder. — Auch **Maas** fand in diesem Versuche eine Andeutung einer undulatorischen Bewegung der Elektricität.

Indess wurde die Richtigkeit dieser Erklärung von **Crahay**[3]) bezweifelt, welcher die Ursache derselben in einer überwiegenden Influenz der auf der Aussenseite des Glasrandes der Flasche angehäuften negativen Elektricität suchte und die entgegengesetzte Ladung nach Fortnahme der Elektricität durch Abreiben mit einem trocknen Tuch nicht mehr beobachten konnte.

Durch Versuche von **von Oettingen** (s. §. 209) ist indess die abwechselnde Ladung der Batterie sicher nachgewiesen worden.

191 Sehr gut kann man die oscillirenden Entladungen einer Batterie beobachten, wenn man ihren Entladungsstrom durch eine **Geissler**'sche Spectralröhre gehen lässt. In vielen Fällen erscheint dabei an der einen (negativen) Elektrode derselben blaues Glimmlicht, von der anderen geht ein Lichtstreifen bis nahe an die negative Elektrode, welcher indess von dem Glimmlicht durch einen dunklen Raum getrennt ist[4]). In einem rotirenden Spiegel betrachtet, erscheint das Bild der Röhre einfach. — In anderen Fällen tritt an beiden Elektroden blaues Glimmlicht auf, oder die ganze Röhre ist von einer weisslichen Entladung erfüllt; der dunkle Raum ist verschwunden. Beobachtet man wiederum das Bild der Röhre direct im rotirenden Spiegel, resp. wirft dasselbe nachher durch eine Linse auf eine matte Glasfläche, so erscheint es vielfach und in den abwechselnden Bildern liegt das Glimmlicht auf entgegengesetzten Seiten. Während bei der einfachen Entladung die Schichten des von der positiven Elektrode ausgehenden Lichts gegen die negative Elektrode convex sind, erscheinen sie bei der oscillirenden nach beiden Seiten convex.

192 Auch durch die Einwirkung eines Magnets auf den mittleren Theil einer etwa 3 bis 5 mm weiten oder in der Mitte zu einem Ellipsoid er-

---

[1]) **Helmholtz**, Erhaltung der Kraft, p. 44, Berlin 1847*; Ges. Abh. p. 46*. — [2]) **Maas**, Bullet. de l'acad. du Bruxelles **15** [1], p. 9, 277, 1848*. — [3]) **Crahay**, ibid. p. 58, 281, 1848*. — [4]) Siehe **Paalzow**, Pogg. Ann. **118**, p. 178, 1863*.

weiterten Entladungsröhre kann man die in einzelnen Fällen hin- und hergehenden Entladungen beim Durchgang des Batteriestromes nachweisen. Legt man die Röhre über die einander genäherten und durch ein 0,5 bis 1 mm dickes Messingblech getrennten Halbanker eines starken Elektromagnets, so erscheint in allen Fällen, wo durch die Beschränkung des Glimmlichtes auf eine Elektrode die Entladung als einfach anzusehen ist, nur eine gegen die Glaswand gedrückte, je nach der axialen oder äquatorialen Lage der Röhre spiralige oder gerade Lichtlinie. — Ist die Entladung abwechselnd gerichtet, so theilt sich das Licht in zwei entgegengesetzt liegende Lichtlinien [1]). Bei axialer Lage der Röhre bilden sich zwei an der vorderen und hinteren Glaswand der Röhre liegende Lichtstreifen, in denen an der Trennungsstelle der Magnetpole die positiven Lichtlinien abbrechen und im Bogen nach der gegenüberliegenden Seite hinübergehen. Bei äquatorialer Lage der Röhre bilden sich zwei an der unteren und oberen Glaswand entlang gehende Lichtlinien. Liegt hierbei die eine Platindrahtelektrode auf der Trennungsstelle der Halbanker, so ist die Erscheinung sehr deutlich; die eine Lichtlinie geht vom Draht z. B. nach der oberen Glaswand, die andere, an der unteren verlaufende, bricht vor dem Draht in einer Spitze scharf ab.

193 Schaltet man endlich in den Entladungskreis der Batterie eine Funkenstrecke zwischen zwei sehr dünnen conaxialen Platindrähten ein, so erglüht bei einfacher Entladung nur der mit der negativ geladenen Belegung verbundene Draht, bei alternirenden erglühen beide [2]).

194 Eine Berechnung über die oscillirenden Entladungen ist von W. Thomson [3]) angestellt worden.

Die Quantität der in einem Conductor angehäuften Elektricität sei gleich Q, und ein den Conductor ableitender Draht enthalte in jedem Moment eine gegen die Elektricität des Conductors geringe Elektricitätsmenge. — Im Conductor sei zu einer bestimmten Zeit t nach der Verbindung mit der Erde die Elektricitätsmenge q. Fliesst durch den Draht in der Zeit dt die Elektricitätsmenge dq ab, so ist die Stromintensität in demselben in elektrostatischem Maass:

$$i = -\frac{dq}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Ist C die Capacität des Conductors, so ist das Potential bei der Ladung q gleich $V_q = \frac{1}{2} q^2 / C$. Dieses Potential ändert sich beim Abfliessen der Elektricität in der Zeit dt um $-dV_q = -q i dt / C$. — Diese Aenderung ist der bei der Entladung der Elektricitätsmenge dq

[1]) Paalzow, Pogg. Ann. 112, p. 567, 1861*. — [2]) Paalzow, Pogg. Ann. 118, p. 357, 1863*; Berl. Monatsber. 1861, p. 880*. Das weitere siehe im Cap. „Gasentladungen". — [3]) W. Thomson, Phil. Mag. [4] 5, p. 393, 1855*.

in dem Leiter gethanen Arbeit gleich. Letztere besteht aus zwei Theilen: einmal aus der directen Wärmeentwickelung im Draht, welche der Arbeit $i^2 r dt$ entspricht, wo r der Widerstand des Drahtes ist; zweitens aus der in Folge der Inductionswirkungen erforderlichen Arbeit zur Herstellung des Stromes. — Denken wir uns die eine Hälfte des Drahtes über die andere umgelegt, so entsteht beim plötzlichen Hindurchleiten des Stromes kein Inductionsstrom in ihm. Wird also der vom Strom i durchflossene Draht aus dieser Lage in seine wirkliche Lage gebracht, so ist dabei dieselbe Arbeit erforderlich, wie beim Entstehen des Stromes in ihm. Diese Inductionswirkung kann im Allgemeinen i^2 proportional, d. i. gleich $\frac{1}{2} P i^2$ gesetzt werden, wo P das Potential des Drahts auf sich selbst ist. Zur Ueberwindung derselben ist also die in der Zeit dt gebrauchte Arbeit, während deren sich i und di ändert, $d(\frac{1}{2} P i^2) = P i di$. Wir erhalten so die Gleichung

$$\frac{q}{C} i dt = P i di + r i^2 dt \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Bei Elimination von i folgt aus 1) und 2):

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{r}{P} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{CP} q = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

welche Gleichung die Lösung

$$q = k e^{\lambda t} + k' e^{-\lambda_1 t}$$

hat, in der λ und λ_1 die Wurzeln der Gleichung

$$x^2 + \frac{r}{P} x + \frac{1}{CP} = 0$$

sind, also

$$\lambda \text{ resp. } \lambda_1 = -\frac{r}{2P} \pm \sqrt[2]{\frac{r^2}{4P^2} - \frac{1}{CP}}.$$

Jenachdem $C \gtrless 4P/r^2$ oder $r^2 \gtrless 4P/C$ ist, werden die Wurzeln λ und λ_1 reell oder imaginär. Man kann den Werth $r_g = 2\sqrt[2]{P/C}$, bei welchem dieser Uebergang stattfindet, als G r e n z w i d e r s t a n d bezeichnen.

Berücksichtigt man, dass für $t = 0$ auch $q = Q$ und $i = 0$ ist, so lässt sich die Lösung der Gleichung 3) folgendermaassen schreiben:

Erstens wenn λ und λ_1 reell sind:

$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{Q}{2aP} e^{-\frac{r}{2P}t} \left\{\left(aP + \frac{r}{2}\right) e^{at} + \left(aP - \frac{r}{2}\right) e^{-at}\right\} \\ i &= \frac{Q}{2aPC} e^{-\frac{r}{2P}t} \left\{e^{at} - e^{-at}\right\}, \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 4)$$

wo $a = \left(\frac{r^2}{4P^2} - \frac{1}{CP}\right)^{1/2}$ ist.

Sodann wenn λ und λ_1 imaginär sind:

$$\left.\begin{aligned} q &= \frac{Q}{a'P}\, e^{-\frac{r}{2P}t}\left\{a'P\cos a't + \frac{r}{2}\sin a't\right\} \\ i &= \frac{Q}{a'PC}\, e^{-\frac{r}{2P}t}\sin a't \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 5)$$

wo $a' = \left(\frac{1}{CP} - \frac{r^2}{4P^2}\right)^{1/2}$ ist.

Im ersten Falle, wo die Werthe λ und λ_1 reell sind, nimmt mit wachsendem t der Werth i erst langsam zu und dann wieder ab. Die Entladung ist continuirlich.

Besässe der Conductor in diesem Falle eine unendlich grosse Capacität C und Ladung Q, so dass das Verhältniss $Q/C = V$ wäre, so würde die Entladung so vor sich gehen, wie wenn eine constante Elektricitätsquelle, z. B. der Pol einer Säule, an dem das Potential der Elektricität V wäre, mit der Erde durch einen Draht verbunden wäre. Dann ist nach 4):

$$i = \frac{V}{r}\left(1 - e^{-\frac{r}{P}t}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ 6)$$

eine Gleichung, welche mit der §. 121 entwickelten Formel für das Ansteigen eines Stromes nach der Schliessung übereinstimmt.

Sind aber λ und λ_1 imaginär, so nimmt i abwechselnd entgegengesetzte Werthe an und es bilden sich oscillatorische Ströme. — Ebenso ist die Ladung q abwechselnd positiv und negativ. Ihre auf einander folgenden Maxima treten zu den Zeiten ein, wo i gleich Null ist, und sind abwechselnd $+Q$, $-Qe^{-\frac{r\pi}{2Pa'}}$, $+Qe^{-\frac{2r\pi}{2Pa'}}$ u. s. w. Je grösser der Widerstand r ist, desto schneller nimmt die Intensität der Strommaxima ab, desto schneller werden die „elektrischen Schwingungen gedämpft“.

Die Intensität des Stromes ist ein Maximum, wenn $di/dt = 0$, d. i. $tg\,a't = 2Pa'/r$ ist. Berechnet man hieraus den für den ersten Quadranten geltenden Werth ϑ von $a't$, so treten die Maxima ein zu den Zeiten $t_1 = \vartheta/a'$, $(\vartheta + \pi)/a'$, $(\vartheta + 2\pi)/a'$ u. s. w., also in Zwischenzeiten, welche gleich π/a' sind. Diese Zwischenzeiten kann man als die Schwingungsdauer der oscillirenden Ströme ansehen. Sie sind um so grösser, je kleiner a' ist oder je grösser C und P sind und ebenso je grösser r ist. Ist der Widerstand r sehr klein, so dass das zweite Glied von a' gegen das erste zu vernachlässigen ist, so werden die Zwischenzeiten gleich $\pi\sqrt{CP}$. Sie sind also dann der Quadratwurzel aus der Capacität des entladenen Conductors und aus dem Potential der einzelnen Theile der Leitung auf einander proportional.

Ist P unendlich klein, also etwa die Spirale, welche den Schliessungsbogen bildet, aus zwei parallelen Drähten gewunden, in denen der Strom

die entgegengesetzte Richtung hat, so fällt aus der Gleichung 2) das P enthaltende Glied heraus und die Lösung der Gleichung wird

$$q = Qe^{-\frac{t}{Cr}}.$$

Dann finden keine abwechselnd gerichtete Ladungen und Ströme statt.

Wie wir oben gesagt, sind die Wurzeln λ und λ_1 reell oder imaginär, je nachdem C grösser oder kleiner als $4P/r^2$ ist. Wird daher der Widerstand r zuerst sehr gross genommen, so ist anfangs die Entladung continuirlich; wird der Widerstand r verkleinert, so wird bei dem Grenzwiderstand $r = 2\sqrt{P/C}$ die Entladung oscillatorisch.

Setzt man $\int\limits_0^\infty i^2 dt = z$ und $\int\limits_0^\infty i dt = y$, so ist die mittlere Intensität des Entladungsstromes $J_m = z/y$, die Dauer der Entladung $T = y^2/z$. Aus den Gleichungen 4) und 5) folgt aber $z = \frac{1}{2} Q^2/r C$, $y = Q$. Dann ist z zugleich proportional der im Schliessungskreise erzeugten Wärmemenge, y seiner galvanometrischen Wirkung. — Ferner ist: **195**

$$J_m = \frac{Q}{2rC}; \quad T = 2rC \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

d. h. die Entladungsdauer ist unabhängig von der Quantität der im Conductor angehäuften Elektricität, proportional der Capacität des Conductors und dem Leitungswiderstande des Entladungsdrahtes, dessen Aenderung durch die Temperaturerhöhung bei der Entladung wir vernachlässigen. Die Intensität des Entladungsstromes ist aber der Quantität Q direct, dem Widerstand des Entladungsdrahtes und der Capacität C des Conductors umgekehrt proportional.

Messende Versuche über die verschiedenen Entladungsformen sind zuerst von Feddersen[1]) angestellt worden, welche, unabhängig von der Theorie angestellt, eine vollständige Bestätigung derselben geben. **196**

Zuerst wurde die Entladung überhaupt bei grossen Widerständen beobachtet, wobei sie entweder continuirlich, einheitlich ist, oder bei sehr grossen Widerständen sich in eine gewisse Anzahl von einander getrennten Partialentladungen auflöst, intermittirend ist.

Zu diesen Beobachtungen diente ein aus zwei vertical über einander befindlichen, 16 mm grossen Kugeln bestehendes Funkenmikrometer, vor welchem durch einen, dem von Ritchie angegebenen ähnlichen, elektromagnetischen Apparat ein Spiegel um eine verticale Axe in Rotation versetzt wurde. Ein auf die Axe aufgesetzter Elfenbeincylinder mit

[1]) Feddersen, Beiträge zur Kenntniss des elektrischen Funkens. Dissertation Kiel 1857*; Pogg. Ann. **103**, p. 69, 1858*; Ber. d. K. Sächs. Ges. **11**, p. 511, 1859*; Pogg. Ann. **108**, p. 497, 1859*; Ber. d. K. Sächs. Ges. **13**, p. 13, 1861*; Pogg. Ann. **112**, p. 452, 1861*; Pogg. Ann. **113**, p. 437, 1861*, **116**, p. 132, 1862*.

Metalleinlagen, auf welchen Metallfedern schleiften, vermittelte zu bestimmten Zeiten die Verbindung der zu entladenden Leydener Batterie (Flaschen von circa 360 qcm Belegung, 4 mm Glasdicke, einem Bindungscoefficienten von 13/14) mit dem Funkenmikrometer, so dass die Ent-

Fig. 59.

1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.

ladung nur bei einer gewissen Stellung des Spiegels erfolgte. Eine gebogene Scala hinter demselben gestattete, die Lage der einzelnen Theile des im Spiegel bei dieser Stellung beobachteten Funkenbildes zu fixiren.

Als Widerstände wurden Röhren voll Wasser in den Kreis eingefügt, in welche von den Enden aus Kupferdrähte gesteckt waren. Ihre Widerstände r sind auf die einer Wassersäule von 1 mm Durchmesser und 1 mm Länge reducirt.

197 Bei 400 bis 1000 Einheiten Widerstand zeigte sich eine continuirliche Entladung. Im Spiegel erschien ein heller schmaler Streifen,

von dem oben und unten schmale parallele Bänder, entsprechend den Elektroden ausgingen, zwischen denen der Mitte des Funkens entsprechend ein dunkler Raum lag. Bei geringeren Widerständen ragten die Bänder immer mehr in letzteren hinein (Fig. 59, Nr. 1, 2), bis er bei kleineren Flüssigkeitssäulen ganz mit Glimmlicht erfüllt war. Zuweilen nehmen die Bänder allmählich an Helligkeit ab, werden aber öfter durch einen oder mehrere helle Partialfunken beendet.

In anderen Fällen zeigte sich im Spiegel eine Anzahl heller anfangs äquidistanter Partialfunken (Nr. 5), zwischen denen der Lichtschein des Untergrundes die continuirliche Entladung erkennen lässt, welche bei grossen Widerständen immer mehr zurücktritt. Die Abstände der Partialfunken nehmen allmählich zu. Diese intermittirende Entladung tritt namentlich bei grossen Widerständen ein und geht bei geringen Widerständen in die continuirliche mehr und mehr über.

Häufig sind die Entladungen unregelmässig und bieten dann im Spiegel ein Bild wie Fig. 59, Nr. 3, 4 dar. Bei der continuirlichen Entladung ist der Funken homogen und erscheint dem Ohr als ein einziger matter Schlag, bei der intermittirenden sieht man oft ein breites Funkenbüschel mit Zwischenräumen und hört ein zischendes Geräusch.

198 Befindet sich das Funkenmikrometer in dem durch den Spiegel erzeugten Luftstrom, so sind zwar die ersten Funken gerade; die folgenden biegen sich aber in der Richtung des Luftstromes mehr und mehr in der Mitte aus (Fig. 59, Nr. 6) oder je nach der Richtung des Luftstromes auch fortschreitend erst mehr oberhalb und dann immer mehr nach unten oder umgekehrt (Nr. 7). Jede folgende Partialentladung scheint also den Weg der vorhergehenden aufzusuchen.

199 Die zeitlichen Abstände der ersten am regelmässigsten erfolgenden Partialfunken der Reihe wurden entweder gemessen, indem die Zahl der Funken auf einem 2,5 oder 5 mm langen Stück der Scala geschätzt wurde, während die Kugeln des Mikrometers bis zum Ueberschlagen des Funkens einander genähert wurden, und die Flasche vom Conductor getrennt war, oder während bei constanter Schlagweite die Flasche durch den Conductor bis zur Entladung immer stärker geladen wurde.

Hiernach nimmt der Abstand der Spiegelbilder, — abgesehen von den bei diesen Versuchen unvermeidlichen Unregelmässigkeiten — mit zunehmender Schlagweite ab. So betrug z. B. der Abstand a in Secunden bei den Schlagweiten s und Widerständen von resp. 480 und 540 mm, welche entweder dicht an der inneren Belegung oder von ihr durch das Funkenmikrometer getrennt eingeschaltet waren:

s	15	10	7	5	10	7	5 mm
$10^6 . a$	58	58	60	76	76	131	163 Sec.

Bei wachsendem Widerstand r nahm bei den nach der zweiten Methode angestellten Versuchen der Abstand der Partialentladungen im

Allgemeinen zu, so z. B., wenn sich r von 480 bis 1110 mm änderte, von 48 bis $174 \, . \, 10^{-6}$ mm.

200 Die Dauer der Totalentladung ist wegen der Veränderlichkeit des Rückstandes der Flasche bei verschiedenen eingeschalteten Wassersäulen schwer zu bestimmen; im Allgemeinen wächst dieselbe sowohl mit der Oberfläche der Batterie, wie mit dem Widerstande.

Nach Riess[1]) ist bei einigen Beobachtungen von Feddersen mit 1 und 2 Flaschen und constanter Schlagweite, also bei constanter Dichtigkeit die Entladungszeit proportional der angewandten Elektricitätsmenge, bei anderen entfernen sich die Resultate weit von diesem Gesetz, was er auf das Nachleuchten der durch die erste Entladung glühenden Metalltheile schiebt, die namentlich bei Einschaltung kürzerer Widerstände in grosser Menge auftreten und sehr stark erhitzt werden. In Folge dessen ist nach ihm die Leuchtdauer des Funkens nicht immer ein Maass für die Entladungsdauer (vergleiche indess dagegen die Versuche von Feddersen, §. 202).

Um die in der Totalentladung ausgeglichene Elektricitätsmenge mit der gesammten Elektricitätsmenge in der Leydener Flasche zu vergleichen, wurde von Feddersen gemessen, wie weit die Kugeln des Mikrometers einander genähert werden mussten, um eine zweite, dritte u. s. f. Entladung zu erzielen. Bei grösseren Widerständen, wo die Aenderungen zu klein waren, wurden die Messungen immer erst nach mehreren Entladungen angestellt. Vorher waren durch Versuche mit der Maassflasche die für diese Schlagweiten erforderlichen Elektricitätsmengen bestimmt.

Als Mittel einer Reihe von Versuchen ergab sich, dass bei zwei verschiedenen Widerständen (Wassersäulen von 1 qmm Querschnitt und 4830 und 240 mm Länge) das Verhältniss der ausgeglichenen Elektricität zur ursprünglichen Ladung mit der Schlagweite zunimmt.

Wäre diese Veränderung des Verhältnisses nur durch den Werth der einzelnen Partialentladungen bedingt, so müsste das umgekehrte Verhalten eintreten, da mit wachsender Schlagweite die an den Funkenelektroden in Folge der vertheilenden Wirkung der abgeleiteten gebundene Elektricität abnimmt, also die ausgeglichene Elektricitätsmenge kleiner werden muss.

201 Werden die Widerstände der Schliessung bei genügender Länge derselben unter einen bestimmten Werth vermindert, so tritt an Stelle der continuirlichen die oscillirende Entladung. Zum Studium derselben verwendete Feddersen[2]) einen ähnlichen Apparat wie den §. 196 beschriebenen, nur wurde an Stelle des Planspiegels ein System von zwei auf der Vorderseite versilberten concaven Hohlspiegeln von

[1]) Riess, Ber. d. Berl. Acad. 1872, p. 341, Abh. 2, p. 93*. — [2]) Feddersen, Pogg. Ann. 113, p. 437, 1861*; auch Ber. d. K. S. Ges. 16. Febr. 1861*; Pogg. Ann. 112, p. 452, 1861*.

100 mm Höhe, 30 mm Breite, 500 mm Krümmungsradius verwendet, welche auf der Vorder- und Hinterseite eines um eine verticale Stahlaxe rotirenden Holzbrettes befestigt waren. An Stelle des elektromagnetischen Rotationsapparates trat ein Uhrwerk. An der Axe des Holzbrettes befanden sich zwei schneidenförmige Messingarme, die mit ihren 2 mm breiten Schneiden an zwei an dem Rahmen des Uhrwerks isolirt befestigten Drähten vorüberschleiften. Diese Drähte waren durch den Funkenapparat und Widerstand mit den Belegungen der Leydener Flasche verbunden, so dass bei einer bestimmten Stellung des Spiegels der Funken vor ihm überging. Die Drehungsgeschwindigkeit wurde durch eine auf $^1/_5$ Secunde zu arretirende Uhr an einem der Räder des Uhrwerks abgelesen. Vor der Axe stand in einem aus isolirenden Substanzen gebildeten Gehäuse der Funkenapparat, bestehend aus zwei etwa 60 mm in verticaler Richtung von einander entfernten Paaren von je zwei vertical über einander liegenden Kugeln von Kupfer, auch von Platin, Zink, Eisen (der Stoff übt nur auf die Helligkeit und Farbe, nicht einen anderen Einfluss aus). Das Bild der Entladung wurde durch den Spiegel auf eine matte Glasplattte, event. auf eine photographisch präparirte Platte projicirt. In letzterem Fall bestanden die Elektroden am besten aus Zinn.

Sollte der Widerstand der Schliessung ohne wesentliche Veränderung seiner Länge vermehrt werden, so wurden Glasröhren von verschiedener Dicke voll verdünnter Schwefelsäure von specif. Gew. 1,25 (Minimum des Widerstandes) oder drei 50 mm lange, circa 0,25 mm dicke Neusilberdrähte, deren Widerstände zusammen gleich der einer 0,045 m langen, 1 mm dicken Säule der Schwefelsäure gleich sind, eingeschaltet. Die Widerstände wurden auf den einer Säule von Schwefelsäure von 1 m Länge und 1 mm Dicke als Einheit bezogen.

202 Bei einem k u r z e n, r e i n m e t a l l i s c h e n Schliessungsbogen erschien bei Projection des Funkenbildes auf der matten Glasplatte ein in der Rotationsrichtung ausgezogenes, conisch zulaufendes, glänzendes Funkenbild, dessen Helligkeit nach der Spitze zu abnahm und dabei von hellem Weiss durch eine grünliche in eine röthliche Färbung überging (Fig. 60). Die Dauer des weissen, grünlichen und röthlichen Lichtes

Fig. 60.

beträgt z. B. bei Entladung einer Flasche von 2 Quadratfuss Oberfläche, 4,5 mm Dicke und 4,5 mm Schlagweite bei einem aus einigen Metern Kupferdraht gebildeten Schliessungsbogen etwa 3, 4 und $6 \cdot 10^{-5}$ Secunden. Der helle weisse Theil ist bei den gleichzeitig beobachteten weissen

Funken, auch bei sehr verschiedener Schlagweite derselben gleich lang, dagegen ist, selbst wenn die Funkenmikrometer durch ganz dicke Drähte verbunden sind, ihnen also die Elektricität in gleicher Weise zuströmt, der rothe Schweif bei kürzeren Funken weniger entwickelt. Bei Elektroden von verschiedenen Metallen ist der Schweif in gleicher Weise wahrzunehmen; bei Einschaltung von grösseren Säurelängen oder Widerständen nimmt er ab. Danach scheint nur der weisse Theil des Entladungsbildes direct der Entladung zu entsprechen, der rothe durch die darauf allmählich erfolgende Abkühlung der durch dieselbe sehr stark erhitzten Gas- und Metalltheilchen bedingt zu sein.

Die Gesammtdauer der Entladung wächst hierbei, wie bei der continuirlichen Entladung, mit der Schlagweite s und der geladenen Oberfläche o (also entsprechend der Theorie). So betrug z. B. die Länge des weissen Lichts:

	$o = 1$				$o = 4$	
$s =$	1,5	3,75	6,75	10	1,5	3,75
$10^5 a =$	4	7 — 8	10	13 — 18	6	13 — 15

203 Bei Zunahme der Widerstände vermindert sich die Länge des Funkenbildes immer mehr, indem der kegelförmige Schweif sich immer weiter verkürzt, so dass zuletzt (z. B. bei zwei Flaschen und 0,006 m Schwefelsäurewiderstand) nur noch eine 1 bis 2 mm breite, die Elektroden verbindende Linie übrig bleibt. Vermehrt man den Widerstand weiter, so verlängert sich wieder das Bild, behält aber die ganze Funkenlänge als Breite bei, wo dann bei grösseren Widerständen der mittlere Theil des Bildes immer dunkler wird und es zuletzt nur aus einer schmalen der Funkenbahn entsprechenden Linie und zweien von ihrem Ende ausgehenden den Elektroden entsprechenden Säumen besteht. Diese Erscheinungen sind also wesentlich von denen vor Durchgang durch das Minimum der Bildlänge verschieden. Letzteres erscheint bei dem Grenzwiderstand. Werden die Widerstände sehr gross, so tritt die §. 197 beschriebene intermittirende Entladung ein.

204 Bei Anwendung eines l a n g e n g u t l e i t e n d e n metallischen Schliessungsbogens, in welchen event. eine Spirale eingeschaltet ist, theilt sich das Funkenbild in eine Anzahl von nach den Seiten abschattirten Transversalstreifen, welche durch dunkle Zwischenräume von einander getrennt sind und den einzelnen Oscillationen der Entladung entsprechen. Diese Streifen werden gegen das Ende der Entladung lichtschwächer, behalten aber ihre Breite bis zum letzten bei, an den sich meist ein gelblich, auch grünlich oder kupferroth gefärbter, nicht gestreifter Lichtschweif anschliesst.

Wächst der Widerstand der Schliessung bei unveränderter Länge, so nimmt die Zahl der Streifen bei gleich bleibender Breite eines jeden bis zu Eins ab, wo dann der Grenzwiderstand eingefügt ist; und darauf

verbreitert sich der Streifen wieder, ohne dass eine scharfe Grenze wahrzunehmen ist. Die Entladung ist wieder continuirlich geworden.

Bei verschiedener Anzahl z der Flaschen der Batterie ist der Grenzwiderstand r_g umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Oberfläche s, resp. Capacität der Batterie und unabhängig von der Schlagweite (1,5 bis 8 mm), also von der Höhe der Ladung der Batterie. Es ist ferner nach der Formel der Quadratwurzel aus dem Potential der Leitung[1]) auf sich selbst proportional.

So war z. B.:

$z =$	1	2	4	8	16	2	8
$10^3 r_g =$	58	41	25	18	14	37	15
ber. $r_g = const/\sqrt{s} =$	56	40	28	20	14		

Bei der ersten Reihe waren Schwefelsäuresäulen, bei der zweiten Neusilberdrähte als Widerstände verwendet. Nach den Beobachtungen kann man die einen durch die anderen ohne Aenderung der Resultate ersetzen. Der Grenzwiderstand ist also von dem Stoff des Leiters unabhängig.

205 Sehr gute Messungen erhielt Feddersen[2]) bei Herstellung photographischer Bilder des Funkens, wobei die Kugeln des Funkenmikrometers zweckmässig bis auf eine kleine Stelle lackirt waren, weil sonst die Elektricität von verschiedenen Punkten derselben ausströmte, durch welche sich event. die oscillirenden Entladungen ausglichen, da dementsprechend mit wachsendem Widerstand der Leitung die Zahl der Ausgangspunkte abnahm.

Die Photographien der durch den rotirenden Spiegel erzeugten Funkenbilder zeigen bei kürzerem gutleitendem Schliessungsbogen schon streifenartige äquidistante Abtheilungen, indess nur an den beiden Säumen, an welchen die Lichtintensitäten alterniren (Fig. 61).

Bei längeren gut leitenden Schliessungsbogen zieht sich das Bild noch mehr in die Länge und besteht aus einzelnen Abtheilungen. Dabei ist die Natur der Elektroden von Einfluss, indem davon die Leichtigkeit des Fortschleuderns der glühenden Metalltheilchen von beiden Elektroden abhängt. Bei Eisen z. B. treten oft die beiden Säume verschieden stark auf, gelegentlich fehlt das Licht der ersten Querabtheilung am positiven Pol ganz. Aehnlich, nur weniger deutlich verhalten sich Pole von Nickel, Blei, Magnesium, Zink. Kohle- und Kupferelektroden liefern keine der-

Fig. 61.

[1]) Dieses Potential wird auch wohl als elektrodynamische Constante der Leitung bezeichnet. — [2]) Feddersen, Pogg. Ann. 116, p. 132, 1862*.

artige von beiden Seiten ausgehende Lichtstreifen; bei Gold, Silber, Platin, Zinn sind Unterschiede nach der Stromesrichtung nicht entschieden zu erkennen. Auch die Dauer des Leuchtens der glühenden Theilchen hängt

Fig. 62.

vom Stoff der Elektroden ab; bei Zink und namentlich bei Zinn ist sie relativ kurz, die Bilder der einzelnen Oscillationen sind durch breitere dunkle Räume von einander getrennt (Fig. 62). Bei anderen Metallen (Kupfer) ist dies nicht so entschieden der Fall.

206 Die Dauer t der einzelnen Oscillationen, wie sie durch Division der Länge eines Theiles des Bildes der Entladung mit der Zahl der Oscillationen und Berechnung auf Secundendauer erhalten wird, ist von der Schlagweite s unabhängig (Zahl der Flaschen $z = 10$; $s = 4$ und 8 mm; $t = 304$ und $305 \cdot 10^{-8}$; ferner $z = 16$; $s = 1{,}5$ und 9 mm; $t = 511$ und $514 \cdot 10^{-7}$ Sec.). Sie ist ferner, wie auch die Theorie zeigt, proportional der Quadratwurzel aus der Capacität C der Batterie. Bei einer Batterie von z gleichen Flaschen ist C proportional z. Dann ist also $t = const \sqrt{z}$. So war z. B.:

$z =$	16	8	4	2
$10^7 . t =$	446	314	224	156 Sec.
$10^7 . t$ ber. $=$	—	315	223	158 Sec.

Diese Relation gilt sowohl bei kurzen geraden, wie bei längeren Leitungen.

Bei Ersatz der Leydener Batterie von 2 Flaschen durch eine solche von 2 Franklin'schen Tafeln bestätigte sich das Gesetz. Die Capacitäten beider Batterien wurden dabei verglichen, indem die Ausschläge eines Galvanometers beim Durchgang der Entladungen derselben bei gleicher Schlagweite (also gleichem Potential) gemessen wurden. Abweichungen der Beobachtungen von der Theorie können davon herrühren, dass die Capacität des Leitungsdrahtes selbst eigentlich mit in Betracht gezogen werden müsste.

207 Wird die Entladung durch Verbindung der inneren Belegung einer geladenen Batterie von der Oberfläche s mit der einer ungeladenen von der Oberfläche s_1 hervorgebracht, während die äusseren Belegungen abgeleitet sind, so ist die Capacität des Systems, d. h. die entladene Elek-

tricitätsmenge nur $s_1/(s+s_1)$ von der bei directer Entladung der ersten Batterie, die Oscillationsdauer ist dann also:

$$t = const \sqrt{\frac{s \cdot s_1}{s + s_1}}.$$

So ergab sich:

$s = 4$	$s_1 = 8$	$10^{-7} t$ beob. $= 178$	$10^7 t$ ber. $= 183$
$s = 2$	$s_1 = 8$	$10^{-7} t$ beob. $= 136$	$10^7 t$ ber. $= 139$

208 Wird der Schliessungsbogen (Kupferdraht von 1,35 mm Durchmesser) verlängert, so wächst auch die Oscillationsdauer t, indess bei weitem nicht im Verhältniss zu der Länge l des Schliessungsdrahtes. So war z. B. bei Entladung einer Batterie von 10 Flaschen:

$l =$	5,26	25,26	65,26	115,26	317,0	1343,0
$10^8 t =$	132	410	753	935	1770	3980 Sec.

Bei diesen Versuchen standen die einzelnen Theile der Leitung mindestens 1 m von einander ab. Liegen sie näher an einander, wie z. B. in Spiralen, so wächst die Dauer der Oscillationen, wenn der Strom in ihnen gleich ist; sie nimmt ab, wenn er entgegengerichtet ist. Mit wachsendem Abstand der Leitertheile nimmt dieser Einfluss ab; bei zwei langen entgegengesetzten Leitertheilen, in denen der Strom in entgegengesetzter Richtung fliesst, wächst die Oscillationsdauer nahezu in arithmetischer Reihe, wenn der Abstand in geometrischem Verhältniss wächst. Bei gleichgerichteten findet das Gegentheil statt. Analog nimmt die Oscillationsdauer ab, wenn ein Theil des Stromes in Parallelzweige gespalten ist, sie nimmt um so mehr ab, je näher dieselben an einander liegen. Ebenso nimmt sie ab, wenn ein Theil der Leitung einen grossen Durchmesser erhält. Wurde z. B. in einer Leitung von 105,26 m Länge der Durchmesser d von 100 m wie folgt geändert, so war die Oscillationsdauer bei der Entladung von 10 Flaschen:

$d =$	2,55 mm	1,35	0,70	0,35
$10^7 t$	96	99	103	108 Sec.

Die Aenderung des Widerstandes hierbei bedingt nicht dieses Resultat; denn wenn sich auch durch Einschaltung z. B. einer Säule von verdünnter Schwefelsäure die Zahl der Oscillationen allmählich vermindert, so wird ihre Dauer dadurch nicht beeinflusst.

209 Auch durch directe Beobachtung der Rückstände der Leydener Batterie hat v. Oettingen[1]) die allgemeinen Beziehungen der oscillatorischen Entladung nachgewiesen.

Eine Batterie, Fig. 63 (a. f. S.), ist unter Einschaltung eines Funkenmikrometers F mit 20 mm grossen Kugeln und eines Widerstandes J durch

[1]) v. Oettingen, Pogg. Ann. 115, p. 513, 1862*.

einen Draht S geschlossen. Mit der inneren Belegung ist der Metallhebel lA, ähnlich wie bei dem Entladungsapparat von Riess Bd. I, §. 164, verbunden, der mit seinem Knopf A gegen die mit dem Conductor C verbundene Kugel K gegendrückt. Ist die Batterie so stark geladen, dass im Funkenmikrometer F ein Funken erscheint, so lässt man den Hebel fallen, wodurch die Kugel A auf eine Kugel L fällt und dadurch die äussere abgeleitete Belegung der Batterie durch das Spiegelgalvanometer G mit gut isolirtem Telegraphendraht mit der inneren Belegung verbindet. Die Richtung und Grösse des Galvanometerausschlages bestimmt die rückständige Ladung der Batterie.

Werden bei J Drahtspiralen eingeschaltet, so sind die Rückstände bei kleinen Schlagweiten positiv, nehmen bei grösseren ab und gehen durch Null in das negative über, wachsen in diesem Sinne, wechseln plötzlich ihr Zeichen, steigen wieder zum Maximum an u. s. f.

Bei kleineren Widerständen können die Maxima, bei denen eine neue Periode beginnt, nicht mehr genauer unterschieden werden.

Bei verschiedener Oberfläche der Batterie finden die ersten Maxima stets bei derselben Dichtigkeit der Ladung der Batterie, wie sie durch die Schlagweite bestimmt ist, statt; ebenso bei der zweiten Periode, wo das Maximum viel grösser ist. Es bedarf also einer bestimmten, von der bereits durchbrochenen Funkenstrecke abhängigen Dichtigkeit des Gegenstromes, um die Funkenbahn rückwärts zu durchlaufen.

Fig. 63.

Die zweite (negative) Periode beginnt um so früher, je kleiner der Widerstand ist; auch nimmt dabei die Anzahl der Alternationen mit der Schlagweite schneller zu; ferner haben im Allgemeinen die Rückstände um so höhere Werthe, also auch die Verhältnisse zweier auf einander folgender Ladungsmaxima um so kleinere Werthe, je grösser der Widerstand ist.

Zuweilen wachsen die negativen Maxima mit wachsender Schlagweite nicht in gleichem Maasse, wie die positiven; zuweilen werden sie nur durch positive Minima ersetzt, was sowohl von der aus dem mit der Batterie gleich nach der Entladung noch verbundenen Conductor austretenden Elektricität, als auch von dem aus dem Dielektricum austretenden Ladungsrückstande herrühren kann. Auch sind die Rückstände, wie zu erwarten, von der Form der Elektroden bedingt.

Die Dauer der Entladung ist bei spiralförmigen Drähten vom Widerstande abhängig. Bei einer gewissen, durch den Widerstand bestimmten

Schlagweite, findet ein Sprung statt, bei dem die Entladungen von kurzer Dauer (bei grösseren Schlagweiten) mindestens um das 30- bis 50fache der Zeit von denen von langer Dauer (bei kleinen Schlagweiten) abweichen. Jede dieser Entladungsarten nimmt innerhalb ihrer Grenzen mit der Schlagweite an Dauer zu. Man kann dies beobachten, wenn man die Entladung zwischen zwei Kügelchen übergehen lässt, welche um eine Axe rotiren und das Bild derselben auf eine matte Glasplatte projicirt.

Wurde in den Schliessungsbogen SF noch ein dem ersten gleiches Galvanometer G_1 eingefügt, so ergab die Summe der Ausschläge $Q = G + G_1$ die Gesammtladung der Batterie. Dieser Werth wächst bei wachsender Schlagweite stetig, während die Ausschläge des Galvanometers G_1 im Hauptschliessungsbogen SF bei der zweiten Periode abnehmen, indem der Spiegel durch den zweiten negativen Strom nach der entgegengesetzten Seite getrieben wird.

Bei Einschaltung geradliniger Drähte (2400 m Neusilberdraht, zickzackförmig auf Holzrahmen gespannt) und Einschaltung von Entladungsröhren erhielt man zwar immer nur positive, mit wachsender Schlagweite zunehmende Rückstände, aber, wenn der Widerstand auf 60 m Neusilberdraht vermindert wurde, von abwechselnder Stärke; die Entladungsröhre zeigte Alternationen an, indem an der negativen Elektrode ein leuchtender Punkt auftrat. Bei kürzeren Drähten und kleineren Schlagweiten kamen auch noch negative Rückstände vor.

Röhren voll verdünnter Schwefelsäure (3 dcm Länge, 2,5 cm Durchmesser) gaben noch negative Rückstände; bei grösseren Widerständen war das Verhalten dem der geradlinigen langen Drähte gleich.

Auch diese Resultate stimmen, so weit es sich bei den dabei einfliessenden unvermeidlichen secundären Umständen erwarten lässt, mit der Theorie überein.

Die Oscillationen zeigen sich auch bei einem älteren Versuch von Knochenhauer, welcher von v. Oettingen erklärt und weiter verfolgt worden ist. **210**

Knochenhauer[1]) verband die äusseren Belegungen zweier Flaschen, Fig. 64 (a. f. S.), mit der Erde. Von der inneren Belegung von A führt ein Draht mit einer Funkenstrecke I zur äusseren Belegung. Die inneren Belegungen sind durch Draht M und durch eine kürzere Leitung mit einer Funkenstrecke II verbunden. Werden die Flaschen geladen, so haben sie gleiches Potential. Findet die Entladung bei I statt, so entladet sich A zuerst und B folgt nach. Ist Draht M lang, so geht bei II ein

[1]) Knochenhauer, Wien. Ber. (2) **25**, p. 71, 1857*; **27**, p. 207, 1858*; **33**, p. 163, 1858*. Leider ist es nur in sehr wenigen Fällen möglich, aus den vielen Versuchen Knochenhauer's allgemeinere Schlüsse zu ziehen.

Funken über. Die Maximalschlagweite II betrug, wenn die Schlagweite in I = 40 war:

M =	8	24	40	56	64	72	90	125	160	200 Fuss
II	35,5	54,5	61,7	59,2	58,0	59,2	66,0	70,5	72,0	72,0

Die Schlagweite II kann also bei Verlängerung von M bis auf das 1,8 fache der Schlagweite I steigen.

v. Oettingen[1]) ersetzte Draht M, welcher in der Mitte mit der Elektrisirmaschine verbunden ist, durch zwei je 1 m lange mit Wasser gefüllte Röhren, durch welche von der Berührungsstelle aus A und B gleichzeitig langsam geladen wurden, und durch die bei Entladung bei I kaum Elektricität von B nach A überging. Wuchs hierbei die Schlagweite I von 1 bis 18, so wuchs die Maximallänge des Brückenfunkens II von 1,75 bis 63; wobei der letztere Funken viel lauter war, als der Funken I.

Fig. 64.

Wurden die Flaschen einzeln ausserhalb abgeleitet, so ergaben sich ganz gleiche Resultate, so dass nicht etwa eine stärkere Ladung von B durch positive Elektricität bedingt sein konnte, die während der Entladung von der inneren Belegung von A auf die äussere Belegung von A und B durch ihren Verbindungsdraht überging. Auch zeigte sich nie in II ein grösserer Funken als in I, wenn Draht a getrennt von Flasche A zur Erde abgeleitet war. Letzteres geschah ebensowenig, wenn a mit A verbunden, b getrennt von B zur Erde abgeleitet war.

Die Ursache der Erscheinung konnte also nicht sein, dass etwa die strömende Elektricität eine grössere Schlagweite hat, als die ruhende von derselben Spannung, wie man wohl vermuthete. Vielmehr geht bei der Entladung von A die ursprüngliche Ladung Q von A in $-mQ$ über, wo $m < 1$ ist. Die Schlagweite zwischen B und A entspricht somit der Differenz der Potentialwerthe Q und $-mQ$, wodurch eine Vergrösserung derselben eintreten kann, die nach den gewöhnlichen Gesetzen der Schlagweite, da $m < 1$ ist, freilich nicht das Doppelte von I erreichen sollte.

Misst man direct die Ladungswerthe, welche je den Schlagweiten I und II entsprechen, indem man in den Schliessungskreis ein Galvanometer einschaltet und den Rückstand durch vollständige Entladung der Flasche durch einen zweiten ein gleiches Galvanometer enthaltenden

[1]) v. Oettingen, Pogg. Ann. Jubelb. p. 269, 1874*.

Kreis mittelst eines Fallapparates misst, so verhalten sich jene Werthe wie 1 : 1,71, so dass also $m = 0{,}71$ wäre.

Die im Vorigen erwähnten Versuche sind einer Reihe unvermeidlicher störender Nebenbedingungen unterworfen. So hat die Luftstrecke, durch welche die Funken hindurchgehen, grossen Einfluss. Wenn durch die erste Entladung die Luft daselbst erwärmt und zerstäubt, also verdünnt worden ist, so nimmt sie in einer je nach den Verhältnissen kürzeren oder längeren Zeit ihre frühere Dichtigkeit wieder an. Folgt dem ersten Strom ein zweiter, weniger dichter, so kann er die Luftstrecke nur durchbrechen, wenn sie noch eine hinlänglich kleinere Dichtigkeit besitzt, als bei der ersten Entladung. Ob dies möglich ist, hängt von dem Grade der Erwärmung und Zerstäubung der Luft durch die erste Entladung und der Zeit zwischen ihr und der folgenden ab. Wird die Oberfläche der Elektroden durch die Entladung verändert, was an der positiven und negativen nicht in gleichem Maasse der Fall zu sein braucht, so kann auch hierdurch dem Durchgange der Entladung im einen oder anderen Sinn ein verschiedenes Hinderniss entgegengesetzt werden. 211

Auch können die Uebergänge der Elektricitäten von den Belegungen auf die freien Flächen des Dielektricums des Condensators von sehr grossem Einfluss sein. 212

Verbindet man z. B. die Belegungen A und B eines Condensators erst mit den beiden Conductoren einer Holtz'schen Maschine und ladet sie resp. positiv und negativ, so laden sich ebenso auch die anliegenden Flächen des Dielektricums durch Uebergang der Elektricitäten. Werden A und B mit einander verbunden, so gleichen sich die in ihnen vorhandenen freien Elektricitäten aus und zugleich ladet sich A an der dem Dielektricum zugekehrten Fläche durch Influenz seitens des Dielektricums negativ, B positiv, falls die Dichtigkeit der Elektricitäten nicht mehr so gross ist, dass die Elektricitäten des letzteren und der Belegungen direct zu einander übergehen[1]). — Finden in dem Schliessungsbogen Inductionsströme statt, die dem Entladungsstrom beim Verschwinden gleichgerichtet sind, so kann dadurch diese Ladung so stark werden, dass sogar negative Elektricität von A, positive von B auf das Dielektricum übertritt. Seine Oberfläche kann dann entgegengesetzt geladen erscheinen, als vorher. Ist die eine Belegung kleiner als die andere, so findet diese Ladung sich nur unterhalb der ersteren Belegung, rings herum gegenüber der grösseren Belegung bleibt die normale Ladung bestehen, von der entgegengesetzten getrennt durch eine neutrale Zone. Durch Bestreuen mit Mennigeschwefelpulver kann man diese Elektrisirung nachweisen.

---

[1]) Vergl. u. A. Cantoni, Rendic Lomb. [2] 2, p. 26, 109, 1869*, 5, p. 613, 708, 1873*; auch Giordano, ibid. p. 916*.

213 Die Ladungen des Dielektricums können je nach den Umständen sehr verschieden sein; sie sind bei Flaschen mit gut isolirendem Glase gross, sie können bei Flaschen mit gut leitendem Glase, welche auch bei Verbindung ihrer beiden Belegungen mit einem Galvanometer einen dauernden Strom geben, sehr schnell abnehmen. Wird daher z. B. eine Leydener Flasche durch eine Elektrisirmaschine geladen, bis sie sich durch ein Funkenmikrometer und durch einen Schliessungskreis mit verschiedenen Widerständen entladet, und sodann nach einiger Zeit der Rückstand mittelst eines Fallapparates durch ein Galvanometer entladen, so erscheint die negative, der Oscillation bei wachsender Schlagweite entsprechende Ladung bei den besser leitenden Glassorten vermindert, die positive vermehrt, so dass die späteren Oscillationen bei wachsender Schlagweite ganz durch letztere verdeckt werden und die Ladung stets positiv ist [1]).

214 Wenn der Strom der Batterie verzweigt wird, so theilt er sich in Betreff seiner galvanometrischen Wirkung nach den für den galvanischen Strom gültigen Gesetzen, indem die in den einzelnen Zweigen beim Entstehen und beim Vergehen der Entladung erzeugten Inductionsströme sich gegenseitig in ihrer Wirkung aufheben [2]).

Dagegen ist die Wärmeentwickelung in jedem einzelnen Zweige nicht proportional seinem Widerstande. Vielmehr wirken secundäre Umstände störend ein. Ist die Oberfläche zweier Parallelzweige verschieden, so bedarf es zunächst zu ihrer Oberflächenladung verschiedener Elektricitätsmengen. In demjenigen, welcher cet. par. eine kleinere Oberfläche besitzt, bildet sich der Strom schneller und er wird stärker erwärmt.

Lässt man den Schlag neben einander durch eine Messingplatte und einen Kupferdraht von gleicher Länge und gleichem Widerstand gehen und schaltet in beide Zweige zwei 0,1 mm dicke und etwa 4 bis 5 cm lange Platindrähte, so erwärmt sich durch den Schlag der Batterie der Platindraht in dem letzteren Zweig stärker [3]).

215 Sind die Parallelzweige so gestaltet, dass in denselben durch die Wechselwirkung ihrer einzelnen Theile Inductionsströme entstehen können, so wird dadurch der Verlauf der Entladungen verändert, oscillatorische Entladungen können hervortreten und die Erwärmungen sind wieder nicht proportional den Widerständen.

Dies wird durch einen Versuch von Riess [4]) belegt.

In den Schliessungsbogen der Batterie war eine ebene Kupferdrahtspirale von 53 Fuss, $^5/_8$ Linie dickem Kupferdraht und ein Luftthermometer eingeschaltet. Als Nebenschliessung zu diesen beiden war ein

---

[1]) v. Oettingen, Wied. Ann. 2, p. 305, 1877*. — [2]) Vergl. Knochenhauer, Pogg. Ann. 126, p. 228 u. f., 1865*; siehe auch 127, p. 443, 1866*. — [3]) Guillemin, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 27, p. 518, 1872*. — [4]) Riess, Berl. Monatsber. 1859*, 1. Abhandl., 1, p. 66*; Pogg. Ann. 106, p. 201, 1859*.

100 Fuss langer, 0,051 Linie dicker Platindraht eingefügt. Wurde die Nebenschliessung geöffnet, so betrug für die Elektricitätsmenge Eins die Erwärmung im Luftthermometer 91, mit der Nebenschliessung trotz des sehr grossen Widerstandes derselben nur 29.

Aehnliche Versuche hat Guillemin (l. c.) angestellt. Er theilt den Entladungsstrom der Batterie zwischen zwei gleichen Drähten, rollt den einen von ihnen zu einer Spirale auf und schaltet in beide Zweige zwei gleiche dünne Eisendrähte ein. Dann erglüht bei der Entladung je nach der Enge der Spiralwindungen der eine oder andere stärker. Zieht man die Spirale in die Länge aus, so erhält man in ihrem Zweige ein Maximum der Wärmeentwickelung, wenn der Draht eine Sinusoide bildet, in der die einander gegenüberliegenden Seiten der Windungen, in welchen also der Strom in entgegengesetzter Richtung fliesst, noch inducirend auf einander wirken. Beim völligen Geradziehen des Drahtes ist die Wirkung geringer. **216**

Eine Berechnung dieser auf den Inductionswirkungen beruhenden Verhältnisse hat Feddersen[1]) ausgeführt. **217**

Ist i die Intensität des Stromes im unverzweigten Theil der Leitung, W der Gesammtwiderstand, sind i_1 und i_2 die Intensitäten, r_1 und r_2 die Widerstände zweier Parallelzweige der Leitung, p_1 und p_2 die Potentiale jedes Zweiges auf sich selbst für die Stromintensität Eins, sind die Potentiale am Anfang und Ende der Stromverzweigung v_i und v_a, so ist bei Vernachlässigung der Inductionswirkungen der Zweige auf einander:

$$\left.\begin{aligned} r_1 i_1 + p_1 \frac{di_1}{dt} &= v_i - v_a \\ r_2 i_2 + p_2 \frac{di_2}{dt} &= v_i - v_a \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Häuft sich an der Eintritts- und Austrittsstelle der Verzweigung keine freie Elektricität an, so ist:

$$i = i_1 + i_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Aus den zwei Gleichungen folgt:

$$\frac{r_1 + r_2}{p_1 + p_2}\, i_1 + \frac{di_1}{dt} - \frac{r_2}{p_1 + p_2}\, i - \frac{p_2}{p_1 + p_2}\, \frac{di}{dt} = 0 \quad \ldots \quad 3)$$

Findet eine oscillatorische Entladung statt, so ist nach §. 194

$$a = \sqrt{\frac{1}{CP} - \frac{r^2}{4P^2}}$$

---

1) Feddersen, K. S. Ber. 1866*, p. 231; Pogg. Ann. 130, p. 439, 1867* (mit etwas geänderten Bezeichnungen).

reell, wo A das Potential der Leitung auf sich selbst, C die Capacität des Drahtes, und zugleich:

$$i = \frac{Q}{aPC} e^{-\frac{r}{2P}t} \sin at \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

wo Q die Elektricitätsmenge in der Batterie bei Beginn der Entladung ist. Wird der Werth von i in die Gleichung 3) eingesetzt, die erhaltene Differentialgleichung nach t integrirt und dabei berücksichtigt, dass für $t = 0$ auch $i_1 = 0$ sein muss, so erhält man:

$$i_1 = B \{D + (p_2 F + r_2 G) e^{-\frac{r}{2P}t} \sin at\}, \text{ wo}$$

$$B = \frac{Q}{\alpha PC} \frac{1}{\left(\frac{r_1 + r_2}{p_1 + p_2} - \frac{r}{2P}\right)^2 + \alpha^2};$$

$$D = \alpha \frac{p_2 r_1 - p_1 r_2}{(p_1 + p_2)^2} \left(e^{-\frac{r}{2P}t} \cos \alpha t - e^{-\frac{r_1 + r_2}{p_1 + p_2}t}\right),$$

$$F = \left(\frac{1}{PC} - \frac{r_1 + r_2}{p_1 + p_2} \frac{r}{2P}\right) \frac{1}{p_1 + p_2}; \quad G = \left(\frac{r_1 + r_2}{p_1 + p_2} - \frac{r}{2P}\right) \frac{1}{p_1 + p_2}$$

ist. Analog ist der Ausdruck für i_2.

Die Werthe $B p_2 F e^{-\frac{r}{2P}t} \sin at$ und $B r_2 G e^{-\frac{r}{2P}t} \sin at$ stellen zwei Wellen im Schliessungskreise dar, von denen sich die erste im umgekehrten Verhältniss der Inductionscoefficienten p_1 und p_2, die andere sich im umgekehrten Verhältniss der Widerstände zwischen den beiden Parallelzweigen theilt. Der Ausdruck BD endlich entspricht einer Welle, welche in dem von beiden geschlossenen Zweigen gebildeten Kreise circulirt.

Die Gesammtintensitäten in beiden Zweigen sind:

$$\int_0^\infty i_1\, dt = Q \frac{r_2}{r_1 + r_2} \text{ und} \int_0^\infty i_2\, dt = Q \frac{r_1}{r_1 + r_2} \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Die Elektricitätsströmung theilt sich also zwischen beiden Zweigen wie ein constanter Strom im umgekehrten Verhältniss der Widerstände.

Die Werthe $\int i^2 dt$ geben nur dann einfache Ausdrücke, wenn $r^2/4P^2$, $(r_1/p_1)^2$ und $(r_2/p_2)^2$ gegen $1/PC$ als verschwindend klein anzusehen sind, was im Allgemeinen der Fall ist, wenn oscillatorische Entladungen auftreten. Ist dann noch p_1/p_2 nahe gleich Eins, so wird:

$$\int_0^\infty i_1^2 dt = \frac{Q^2}{2WC} \left(\frac{p_2}{p_1 + p_2}\right)^2$$

und

$$\int_0^\infty i_2^2 dt = \frac{Q^2}{2WC} \left(\frac{p_1}{p_1 + p_2}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Die diesen Werthen proportionalen Erwärmungen an einander entsprechenden Stellen in beiden Parallelzweigen verhalten sich also umgekehrt proportional den Quadraten der Coefficienten der Selbstinduction.

Aehnlich gestalten sich die Erwärmungen in drei Parallelzweigen mit den elektrodynamischen Potentialen p_1, p_2, p_3. Sie ist z. B. im Zweige I:

$$\frac{Q^2}{2\,W\,C}\left(\frac{p_2 p_3}{p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_3 p_1}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6)$$

An Stelle der Widerstände bei den Erwärmungen durch den galvanischen Strom sind also bei den Erwärmungen durch die oscillirende Entladung die Inductionscoefficienten in Betracht zu ziehen.

218 Ist der Schliessungskreis nur aus dem Widerstande r_0 der unverzweigten Schliessung und dem Zweige r_1 gebildet, so ist die in r_0 resp. r_1 entwickelte Wärmemenge:

$$\vartheta_0 = \frac{r_0\,Q^2}{2\,(r_0 + r_1)\,C}, \qquad \vartheta_1 = \frac{r_1\,Q^2}{2\,(r_0 + r_1)\,C}.$$

Ist neben Zweig r_1 noch r_2 eingefügt, so wird die im unverzweigten Theil erzeugte Wärme:

$$\vartheta_{1,2} = \frac{r_0\,Q^2}{2\,r\,C},$$

wo r der gesammte Widerstand der Schliessung mit beiden Zweigen ist.

In den beiden Parallelzweigen zusammen ist die Wärme:

$$\vartheta_3 = \frac{Q^2}{2\,r\,C}\,\frac{p_2^2 r_1 + p_1^2 r_2}{(p_1 + p_2)^2}.$$

Da nun in beiden Fällen die gesammte Wärmemenge gleich, also $\vartheta_0 + \vartheta_1 = \vartheta_{1,2} + \vartheta_3$ sein muss, so folgt:

$$r = r_0 + \frac{p_2^2 r_1 + p_1^2 r_2}{(p_1 + p_2)^2}.$$

Demnach kann $\vartheta_{1,2} < \vartheta_0$ sein, wenn $r > (r_0 + r_1)$ oder $p_1 r_2 > (p_1 + 2 p_2)\, r_1$ ist. Durch Anbringung von Zweig r_2 kann also in Folge der Inductionswirkungen die Erwärmung im Hauptstrome herabgedrückt werden, entgegen den bei constanten Strömen gültigen Verhältnissen.

219 Eine derartige Beobachtung machte Riess[1]), als er der Schliessung der Batterie einen 22 Zoll langen, $^7/_{24}$ Linien dicken Kupferdraht einfügte und die Erwärmung an einer anderen Stelle der Schliessung bestimmte. Sie war gleich 35,5. Wurde nun zu dem Kupferdraht ein 3,9 Fuss langer, 0,028 Linien dicker Platindraht als Nebenschliessung angebracht, so sank die Erwärmung an jener Stelle der unverzweigten Schliessung

[1]) Riess, Reibungsel. 1, p. 450, §. 488.

auf 31,5. Bei Verlängerung des Platindrahtes stieg die Erwärmung bis über den oben erwähnten Werth (35,5).

Sind in einzelnen besonderen Fällen die Werthe p den Werthen r proportional, so gelten die gewöhnlichen Erwärmungsgesetze [1]).

220 Schon vor diesen Berechnungen hatte Knochenhauer [2]) nachgewiesen, dass das Joule'sche Gesetz bei verzweigten Batterieentladungen nicht gültig ist. Er theilte den Strom zwischen zwei gleiche Zweige mit zwei gleichen Luftthermometern, brachte in den einen Zweig den zu untersuchenden Draht und in den anderen eine solche Länge von gestrecktem Kupferdraht von gegebener Dicke, dass in beiden Zweigen die Erwärmungen die gleichen waren. Die letztere Länge nennt er die äquivalente Länge des Kupferdrahtes.

Wurden die äquivalenten Längen sämmtlicher Theile beider Zweige bestimmt, so waren die gesammten Erwärmungen derselben umgekehrt proportional den Quadraten ihrer gesammten äquivalenten Längen.

Nach Untersuchung einer Anzahl von Drahtrollen, deren äquivalente Längen Knochenhauer [3]) bestimmt hatte, fand Feddersen, dass die Oscillationsdauern τ bei Entladung der gleichen Batterie durch dieselben den Quadratwurzeln aus ihren äquivalenten Längen entsprachen. Da aber auch $\tau = \pi \sqrt{PC}$ ist, wo P das Potential des Leitungsdrahtes auf sich selbst ist, so ist letzteres bei gleichbleibender Capacität mit der äquivalenten Länge Knochenhauer's identisch [4]).

b. Nebenströme.

221 Wie in dem Schliessungskreise der Batterie selbst, hat man auch Inductionsströme in Leitern nachgewiesen, welche dem Schliessungskreis nahe liegen. Indess sind die Verhältnisse wegen der Complicationen bei der Entladung der Batterie ebenfalls sehr verwickelt.

Zum Nachweis der Inductionsströme entladet man den Conductor oder die Batterie durch eine Spirale aus Kupferdraht mit einem Guttapercha- oder Kautschuküberzug, um das Ueberschlagen von Funken zwischen

---

1) Siehe z. B. derartige Versuche von Riess, Pogg. Ann. **63**, p. 496, 1844*; Reibungsel. **1**, p. 436 u. flgde.* — 2) Knochenhauer, Pogg. Ann. **60**, p. 70, 1843*; **61**, p. 55, 1844*; Wien. Ber. **43**, p. 27, 1861* und a. a. O. — 3) Knochenhauer, Pogg. Ann. **127**, p. 593, 1866*. Weitere Versuche und Berechnungen von Knochenhauer, aus denen sich leider meist keine weiteren Schlüsse ziehen lassen: Wien. Ber. **22**, p. 327, 1857*; **36** [2], p. 427, 1859*; **46** [2], p. 462, 1863*; Pogg. Ann. **67**, p. 327; **68**, p. 136, 1846*; **79**, p. 255, 1850*; **133**, p. 447, 655, 1868*; **141**, p. 596, 1870*; Ergbd. **5**, p. 470, 1871*; Ergbd. **6**, p. 302; **153**, p. 607, 1874*. — 4) Siehe auch die Polemik von Feddersen, Pogg. Ann. **139**, p. 639, 1870* und Knochenhauer, Pogg. Ann. **141**, p. 596, 1870*.

den Windungen zu vermeiden, und bringt in die Nähe der Spirale oder in dieselbe eine ebensolche Inductionsspirale. Namentlich hat man sich aber ebener Drahtspiralen, Fig. 65, bedient, die in spiralförmige Rinnen auf Holzscheiben eingelegt wurden, welche mit Siegellack überzogen waren. Die Holzscheiben werden über einander gelegt oder vertical vor einander auf Glasfüssen aufgestellt, so dass die eine auf einen messbaren Abstand von der anderen gebracht werden kann [1]).

Fig. 65.

222 Durch die Ablenkung der Nadel eines in den Inductionskreis eingeschalteten Galvanometers kann man die hierbei entstehenden Inductionsströme nicht wohl nachweisen, da sie aus zweien, gleiche Quantitäten Elektricität führenden, entgegengesetzten, beim Entstehen und Vergehen des inducirenden Entladungsstromes gebildeten Strömen zusammengesetzt sind. Wohl aber kann man die Inductionsströme durch Elektrolyse erkennen. Schaltet man in den Inductionskreis einen Jodkaliumelektrolyseapparat, so erhält man an beiden Platindrähten Jodflecke. Ferner erhält man an einer Unterbrechungsstelle des Inductionskreises bei hinlänglicher Stärke der Induction Funken, bei Einschaltung eines Luftthermometers in demselben eine Erwärmung seines Drahtes, bei Einfügung des menschlichen Körpers Erschütterungen [2]) und beim Einlegen von Stahlnadeln in eine kleine, in den Inductionskreis eingeschaltete Spirale Magnetisirungen derselben, da sich die magnetisirenden Wirkungen der beiden ungleich schnell verlaufenden Theile des Inductionskreises nicht völlig aufheben. Durch letztere Wirkung würde im Jahre 1838 der Inductionsstrom bei der Batterieentladung von Marianini entdeckt [3]).

---

[1]) Riess, Pogg. Ann. **83**, p. 309, 1851*; Reibungselektricität **2**, p. 279*. Die Spiralen von Riess hatten 1) Holzscheiben von 6 Zoll Durchmesser, 14 Windungen eines 13 Fuss langen, 0,55 Linien dicken Kupferdrahtes, äusserste Windung 34,5 Linien Radius; 2) Holzscheiben 1 Fuss Durchmesser, 31 Windungen eines 53 Fuss langen, $^2/_3$ Linien dicken Kupferdrahtes; kleinster Radius 9,7, grösster 68,3 Linien; Abstand zweier Windungen 1,2 Linien. Riess selbst bezeichnet die Induction bei den Batterieentladungen als Elektro-Induction, den inducirenden Strom als Hauptstrom, den Inductionsstrom als Nebenstrom, die betreffenden Leitungen als Hauptbogen und Nebenbogen oder Nebenschliessung, die inducirenden Theile derselben als Hauptdraht, Hauptspirale und Nebendraht, Nebenspirale. — [2]) Henry, Sturgeon's Annals of Electr. **4**, p. 303*. — [3]) Marianini, Memorie di fisica sperimentale, Modena 1838.

Auch schon wenn man zwei gerade Drähte parallel neben einander ausspannt und durch den einen die Entladung einer Batterie führt, kann man in der mit dem anderen verbundenen Schliessung die Induction durch die erwähnten Mittel nachweisen.

223 Die Richtung dieser inducirten Ströme entspricht ganz der der galvanischen Inductionsströme. Der beim Entstehen des Entladungsstromes der Batterie erzeugte Inductionsstrom ist demselben entgegengerichtet, der bei seinem Vergehen inducirte ihm gleichgerichtet. Man kann dies nachweisen, wenn man in den Schliessungskreis der Inductionsspirale eine Entladungsröhre einschaltet, in welcher die Entladung zwischen zwei Metallelektroden durch sehr verdünnte Luft übergeht, und vor derselben einen Spiegel um eine der Röhre parallele Axe rotiren lässt. Man sieht bei der Entladung direct, dass beide Elektroden der Röhre mit blauem Glimmlicht bedeckt sind, beide also als negative Elektroden dienen. Im Spiegel beobachtet man (in normalen Fällen) zwei Bilder der Röhre, in welcher das an den entgegengesetzt liegenden Elektroden auftretende blaue Glimmlicht anzeigt, dass bei den Entladungen die mit demselben überzogenen Elektroden als negative Elektroden für die Inductionsströme dienen. Die hieraus abzuleitende Stromesrichtung entspricht den obigen Angaben.

Indess sind die Erscheinungen selten so einfach, wie wir eben angegeben haben, da jede einzelne Partialentladung der Batterie zwei Inductionsströme in der Inductionsspirale bedingt und ferner der Verlauf der primären Entladung sowie auch der Inductionsströme ganz wesentlich durch Inductionswirkungen der Theile jedes einzelnen Kreises auf einander geändert wird, wobei sich z. B. in beiden Oscillationen bilden können u. s. f.

224 Die beiden entgegengesetzt gerichteten Theile des Inductionsstromes bei der Batterieentladung lassen sich auch von einander trennen, wenn man ihn durch ein mit stark verdünnter Luft gefülltes elektrisches Ventil hindurchgehen lässt. Strömt dabei der in der Nebenspirale in der Richtung des inducirenden Hauptstromes fliessende Inductionsstrom von der Spitze zur Fläche (Spitzenstellung) oder umgekehrt (Flächenstellung), so erhält man in beiden Fällen an der in die Schliessung eingeschalteten Spiegelbussole gleiche Ablenkungen, ein Beweis, dass der Inductionsstrom aus zwei Strömen besteht, die gleiche aber entgegengesetzte Elektricitätsmengen führen [1]).

---

[1]) Riess, Pogg. Ann. **120**, p. 513, 1863*; Abhandl. **1**, p. 308*; siehe auch Knochenhauer, Pogg. Ann. **129**, p. 78, 1866*. Weitere Arbeiten über den Nebenstrom siehe Knochenhauer, Pogg. Ann. **58**, p. 391, 1843*; **64**, p. 64, 284, 1845*; **66**, p. 235, 1845*; **70**, p. 106, 255, 1847*. Wien. Ber. 1848 [4] p. 10*. Die Versuche lassen wiederum meist keine einfachen Schlüsse zu. Bei erhöhtem Luftdruck (von 1,25‴ bis 28″) nehmen die Ablenkungen sowohl bei der Flächen- wie bei der Spitzenstellung des Ventils (d. h. wenn ein dem

Werden zwei Ventile in gleicher Richtung in den Schliessungskreis eingeschaltet, so bleiben die Ablenkungen die gleichen, wie bei einem Ventil; so dass also schon ein Ventil die Ströme vollständig trennt.

Werden beide Ventile entgegengesetzt gestellt, so geht durch beide mit sehr verminderter Intensität nur der dem Hauptstrom gleichgerichtete Inductionsstrom hindurch.

225 Auch mittelst des Doppelventils von Feddersen (§. 183) lassen sich die beiden entgegengerichteten Theile des Nebenstromes nachweisen.

Leitet man denselben durch die in entgegengesetzter Richtung neben einander geschalteten Windungen eines Differentialgalvanometers, so verursacht er keine Ablenkung. Wird aber die mittlere Elektrode des Ventils mit dem einen Ende des Inductionskreises, werden die beiden Endelektroden durch die entgegengesetzt gestellten Spiralen des Galvanometers mit dem anderen Ende des Inductionskreises verbunden, so gehen die beiden entgegengesetzten Inductionsströme im Nebenkreise bei Entladung der Batterie durch die beiden Hälften des Doppelventils und die Galvanometerspiralen und lenken so die Nadel des Galvanometers ab [1]).

226 Verbindet man das eine Ende der Inductionsrolle direct mit der Condensatorplatte, das andere unter Einschaltung eines Ventils und eines Funkenmikrometers mit der Collectorplatte eines Condensators, so ladet sich letztere dementsprechend bei der Induction positiv, wenn ihr die Fläche, negativ, wenn ihr die Spitze des Ventils zugekehrt ist [1]).

227 Weniger deutlich, als durch die Geissler'schen Röhren und Ventile, hatte schon früher Buff [2]) die Richtung der inducirten Ströme durch folgende Vorrichtung nachgewiesen.

Er schob in eine Spirale *B*, Fig. 66 (a. f. S.), welche einerseits mit der Erde *E*, andererseits mit einer Kugel *C* verbunden war, auf welche Funken vom Conductor *A* der Elektrisirmaschine übersprangen, eine zweite auf eine Glasröhre gewundene Inductionsspirale *S* ein, deren Enden mit einem Galvanometer *G* in Verbindung standen. Vor dem Galvanometer war ein Funkenmikrometer *M* als Nebenschliessung angebracht. Auch konnte der Schliessungskreis von *S* direct bei *N* durch eine Funkenstrecke unterbrochen werden.

Hauptstrom gleichgerichteter Nebenstrom von der Fläche des Ventils zu dessen Spitze oder umgekehrt fliesst) erst ab und dann wieder zu. Bei der ersteren Stellung geschieht dies langsam, der Ausschlag ist dem Hauptstrom gleich gerichtet. Bei der Spitzenstellung ist auch der Ausschlag negativ, d. h. dem bei der Flächenstellung entgegengerichtet, nimmt dann schnell bis Null ab und steigt darauf im positiven Sinn, bis er dem Ausschlag bei der Flächenstellung fast gleich ist. Dies dürfte ein Beweis sein, dass der dem Hauptstrom gleichgerichtete Strom der dichtere ist, da er noch dichtere Luftstrecken zu durchbrechen vermag.

[1]) Riess, Monatsber. d. Berl. Akad. 1865, p. 397*; Abh. 1, p. 359*; Pogg. Ann. 126, p. 573, 1865*. — [2]) Buff, Ann. d. Chem. u. Pharm. 86, p. 306, 1853*.

War der Kreis bei N nicht unterbrochen, und waren die Kugeln von M ein wenig von einander entfernt, so nahm mit wachsender Schlagweite zwischen A und C der Ausschlag der Galvanometernadel im Sinne eines dem Hauptstrom entgegenlaufenden Stromes von Null an zu, dann ab, indem bei der kleinsten Schlagweite der gleichgerichtete, dichtere Strom noch nicht zwischen den Mikrometerkugeln überging. Wurde statt des Mikrometers in M direct in den Galvanometerzweig die Funkenstrecke N eingefügt, so zeigte die Ablenkung des Galvanometers einen dem Hauptstrom gleichgerichteten Strom an, der denselben Gang bei wachsender Schlagweite verfolgte, indem der entgegengerichtete wiederum nicht die gehörige Dichtigkeit zum Ueberschlagen besass.

Fig. 66.

Die analogen Resultate ergeben sich, wenn das Galvanometer durch ein Voltameter mit Platinplatten in verdünnter Schwefelsäure ersetzt wird. Entsprechend der Richtung der Ablenkung des Galvanometers bei den oben erwähnten Versuchen erfolgt auch die Polarisation der Platinplatten.

228 Inductionsströme höherer Ordnung kann man auch bei der Batterieentladung erhalten. Man schaltet in den primären Schliessungskreis der Batterie eine Spirale I ein, bringt in die Nähe derselben eine Inductionsspirale II und fügt in deren Schliessungskreis eine dritte Spirale III ein. Vor letzterer steht eine vierte Spirale IV, deren Leitung ein Funkenmikrometer, ein Luftthermometer, eine mit verdünnter Luft gefüllte Entladungsröhre, ein Ventil u. dgl. m. enthält. Bei hinlänglicher Stärke des Entladungsschlages der Batterie kann man in dem tertiären Kreise der Spirale IV Funkenentladungen und Erwärmungen beobachten.

229 Die Richtung der Ströme höherer Ordnung bei der Batterieentladung befolgt im Allgemeinen dasselbe Gesetz, wie bei der Schliessung und Oeffnung des Stromes der galvanischen Säule. Bei dem Anschwellen und Fallen des (+) Stromes in dem Hauptkreise der Batterie entstehen in der secundären Leitung je zwei Inductionsströme, die denen des Hauptkreises entgegen (—) und gleichgerichtet (+) sind. In dem tertiären Kreise erzeugen diese Ströme vier Ströme, deren Richtung durch die Zeichen + — + — angegeben werden kann. Man kann diese Ströme wiederum nachweisen, wenn man in die eine oder andere Schliessung eine Entladungsröhre einschaltet und ihr Bild in einem rotirenden Spiegel

betrachtet. Der abwechselnd an der einen oder anderen Elektrode auftretende dunkle Raum in der leuchtenden Entladung in der Röhre bezeichnet jedesmal die Eintrittsstelle der negativen Elektricität in die Röhre.

Durch das §. 227 erwähnte Verfahren hatte schon Buff (l. c.) gefunden, dass bei grossen Schlagweiten zwischen Conductor und Kugel an der primären Spirale, resp. Einführung einer Unterbrechungsstelle in den secundären Kreis, durch eine dünne Luftschicht im tertiären Kreise nur der dem Hauptstrom entgegengerichtete Antheil des tertiären Stromes hindurchgeht, also dichter verläuft. Bei Schliessung des secundären Kreises, wo beide Stromesantheile denselben durchlaufen, trat die entgegengesetzte Richtung hervor. Bei vollkommen metallischer Schliessung des tertiären Kreises kann das in ihn eingefügte Galvanometer bei guter Isolation keinen Ausschlag geben.

230 Durch das Ventil lassen sich auch die Ströme höherer Ordnung theilen; bei gehöriger Luftverdünnung gehen nur die Antheile hindurch, bei denen die positive Elektricität von der Fläche zur Spitze fliesst; dieselben führen gleiche Elektricitätsmengen und lenken die Galvanometernadel bei beiden Stellungen des Ventils gleich stark ab.

Im Allgemeinen tritt bei Flächenstellung des Ventils eine langsame Abnahme der Ablenkungen der Magnetnadel ein bei Strömen gerader Ordnung, eine schnelle, resp. auch ein Wechsel der Stromesrichtung bei denen ungerader Ordnung ein.

Der Grund dürfte der sein, dass im secundären Kreis der dem Hauptstrom gleichgerichtete Antheil des Inductionsstromes der dichtere ist, also noch dichtere Luftsäulen zu durchbrechen vermag; bei den folgenden Inductionsströmen sind die durch das Ventil leichter gehenden, also dichteren Stromesantheile entgegengerichtet.

231 Lässt man sowohl den secundären wie den tertiären Strom durch ein Ventil gehen, so ist die Ablenkung der Nadel eines Galvanometers durch den tertiären Strom, wenn die Ventile in beiden Kreisen in Bezug auf einen dem Hauptstrom gleichlaufenden Strom in Flächenstellung sind, grösser, nimmt aber schnell mit Vermehrung des Druckes ab, während sie bei der Spitzenstellung nur wenig abnimmt, und umgekehrt bei entgegengesetzter Lage des Ventils im secundären Strom. Analog verhält es sich mit den Strömen höherer Ordnung.

Wird also ein Strom höherer Ordnung durch einen einseitig gerichteten Strom inducirt, so ist der dem inducirenden Strom entgegengerichtete Strom der dichtere, und er führt durch das Ventil eine grössere Elektricitätsmenge zum Galvanometer [1]).

Auch Condensatoren lassen sich durch die Ströme höherer Ordnung in ähnlicher Weise, wie durch die secundären Ströme laden [vergl. §. 226] [2]).

---

[1]) Riess, Abhandl. 1, p. 358*; Pogg. Ann. 124, p. 273, 1865*. — [2]) Riess, l. c., §. 226*.

Die Verhältnisse der Ströme höherer Ordnung treten in Folge der Partialentladungen und oscillatorischen Entladungen im Hauptstrom selten einfach auf, da jede einzelne von ihnen im secundären Kreise zwei Inductionsströme in entgegengesetzter Richtung bedingt u. s. f. Die Verhältnisse sind demnach so complicirt, dass nach Feststellung des Grundprincips die Verfolgung desselben ins Einzelne nur ein sehr secundäres Interesse hat.

232 Alle anderen Methoden der Untersuchung, welche früher eine nur einseitige Richtung der Inductionsströme ergeben hatten, führten zu keinem bestimmten Ziel [1]).

Man schaltete z. B. in den Schliessungskreis des Nebenstromes zwischen zwei Spitzen eine beiderseits mit Pech überzogene Metallplatte ein und bestäubte sie mit Mennigschwefelpulver. Eine positive, gelbe Strahlenfigur erscheint auf dem der inneren Belegung der positiv geladenen Batterie zunächst liegenden Ende *i*, eine rothe Ringfigur an dem der äusseren Belegung zunächst liegenden Ende *a*, so dass dadurch ein Strom in den dem Hauptstrom nächst liegenden Theilen der Nebenschliessung angedeutet ist, welcher dem Hauptstrom entgegengerichtet ist. Indess sind hierbei stets die Figuren in Folge oscillirender Entladungen und Rückströmungen aus positiven und negativen Theilen gemischt, so dass sie keine deutliche Anzeichen geben [2]).

Wurde *a* mit der einen, zur Erde abgeleiteten Scheibe eines Condensators, *i* mit einer kleinen, der anderen Condensatorscheibe gegenüberstehenden Metallkugel verbunden, so lud sich die mit *i* verbundene Condensatorplatte unter Uebergang eines kleinen bläulichen Funkens bei richtiger Entfernung der Kugel abwechselnd positiv oder negativ.

Wurde die Lullin'sche Karte (s. d. Cap. Funkenentladung) mit keilförmigen Stanniolblättern in die Schliessungen eingefügt, so zeigte im secundären, tertiären und quaternären Bogen die Durchbohrung einen dem primären Strom entgegengerichteten Strom an [3]).

Diese Versuche bieten eben nur einen Beweis, dass der erwähnte unter den abwechselnd gerichteten Strömen in den inducirten Kreisen der dichtere ist.

233 Analog verhält es sich mit der elektrolytischen Bestimmung der Stromesrichtung. Verdet [4]) leitete den inducirten Strom bei der Entladung der elektrischen Batterie mittelst zweier Platin- oder Golddrähte durch verdünnte Säure resp. Jodkaliumlösung und bestimmte die Richtung des inducirten Stromes durch die Richtung der Polarisation, welche dadurch

---

[1]) Vgl. übrigens Riess, Abhandl. **1**, p. 87; Berl. Monatsber. 1866*. Riess, Rep. d. Phys. **6**, 231; Reibungselektr. **2**, §. 898, p. 347 u. f. Pogg. Ann. **83**, p. 349, 1851*. — [2]) Riess, Abhandl. **1**, p. 107; Berl. Monatsber. 1860, p. 84*. — [3]) Vergl. Pictet und Matteucci, Arch. de l'Él. **1**, 141; vergl. auch Riess, Reibungselektr. **2**, §. 902, p. 351*. — [4]) Verdet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] **24**, 377, 1848*. Riess, Reibungselektr. **2**, §. 903, p. 351*.

verstärkt wird, dass in dem inducirten Kreis eine Unterbrechungsstelle hergestellt wird, an der ein Funken zwischen einer positiven Spitze zu einer negativen Quecksilberfläche übergeht. Die Regelmässigkeit der Erscheinung leidet dann bei sehr geringem Abstand von Spitze und Platte nicht, während sie bei umgekehrter Leitung erst bei grossem Abstand oder starken Ladungen eintritt. Die Drähte werden durch einen dem Entladungsstrom gleichgerichteten Inductionsstrom polarisirt. — Dasselbe gilt von Entladungen höherer Ordnung.

Hierbei sind zwar die Mengen der Ionen, welche durch den dichteren und weniger dichten der beiden jeweiligen Inductionsströme erzeugt werden, die gleichen, wenn nicht schon durch die Funkenstrecke der Uebergang des weniger dichten mehr oder weniger gehemmt wird. Da sich aber die Ionen im umgebenden Medium verbreiten, resp. von den Elektroden absorbirt werden, und zwar besonders bei der länger andauernden Ladungszeit durch den weniger dichten Strom, so überwiegt die Polarisation durch den dichteren Strom.

234 Wir haben schon §. 223 erwähnt, dass der Verlauf der in einem inducirten Kreise durch den Batteriestrom erzeugten Nebenströme wesentlich durch alle Veränderungen im Hauptstrome beeinflusst wird, welche durch Extraströme, Partialentladungen u. s. f. bedingt sind. Ausserdem können die einzelnen Theile der Leitung des Nebenstromes selbst auf einander, sowie auf die Hauptleitung inducirend wirken, wodurch die Verhältnisse in noch höherem Grade complicirt werden.

In dieser Weise kann man auch in Nebenkreisen oscillatorische Entladungen beobachten; auch verläuft der eine oder andere Theil derselben verschieden schnell, so dass nur der eine durch eine Entladungsröhre fliesst. Dies zeigt z. B. der folgende Versuch[1]). Eine ebene Spirale ist mit einer Entladungsröhre verbunden; eine zweite ihr gegenüberstehende Spirale einerseits mit dem negativen Conductor der Holtz'schen Maschine, andererseits mit der einen Belegung eines Luftcondensators, dessen andere Belegung mit dem dem negativen Conductor gegenüberstehenden positiven Conductor der Holtz'schen Maschine verbunden ist. Hierbei durchfliesst nach einander der Ladungs- und der Entladungsstrom die inducirende Spirale, wobei man deutlich bei einer gewissen Schlagweite den Unterschied der Lichterscheinung an beiden Elektroden der Entladungsröhre sieht. Bei Verminderung der Schlagweite kann sich dieselbe 3 mal umkehren, während zwischen den Umkehrungen Momente eintreten, bei denen beide Elektroden gleich erscheinen. In dem Moment der ersten Umkehr bilden sich breite und weit von einander entfernte Streifungen. — Aehnlich wirkt die Aenderung des Abstandes der Inductionsspiralen oder der Platten des Condensators.

---

1) Neyreneuf, Compt. rend. 79, p. 1071, 1874*.

235 Auch die Wärmewirkungen des Nebenstromes hängen von dem durch die oben erwähnten Bedingungen modificirten Verlauf desselben ab. Die genaueren Verhältnisse derselben können nur durch Rechnung aus den allgemeinen Principien der Induction abgeleitet werden, nachdem die Potentiale der Kreise auf einander und je auf sich selbst, sowie die übrigen Bedingungen bestimmt sind. Ohne Berücksichtigung dieser Data ist auf rein experimentellem Wege nur der allgemeine Gang der Erscheinungen unter den jeweilen obwaltenden Versuchsbedingungen zu verfolgen. Deshalb wird es genügen, nur einige Data anzugeben, da man ohnehin die bestimmenden Bedingungen nicht vollständig übersehen kann [1]).

236 Die Erwärmungen in dem Schliessungskreise des Nebenstromes und Hauptstromes zusammen müssen dem Potential der Ladung der Batterie äquivalent sein. Wie also auch das System beider geändert wird, stets ist die Wärme im Haupt- und Nebenstrom zusammen constant.

Man kann dies nachweisen, indem man in beide Leitungen Luftthermometer einfügt und aus den in ihnen beobachteten Wärmemengen die in den ganzen Schliessungen erzeugten berechnet, vorausgesetzt, dass nicht durch Induction der Theile der einzelnen inducirenden Kreise die Vertheilungen des Potentials der freien Elektricitäten und Arbeitsleistungen resp. Wärmeerzeugungen in ihnen verändert werden.

In diesem Fall allein kann man die erzeugten Wärmemengen dem Quadrat der Stromintensität in den verschiedenen Kreisen proportional setzen. Unter dieser Annahme ist auch bei Wechselwirkung mehr oder weniger langer Theile des inducirenden und inducirten Kreises die so gemessene Stärke des Inductionsstromes dem Product der Längen der aufeinander wirkenden Theile direct und ihrem Abstand umgekehrt proportional u. s. f. Indess treten so einfache Verhältnisse fast niemals auf.

237 Da die durch das Luftthermometer gemessenen Erwärmungen ϑ in der Schliessung des Nebenstromes von denselben Grundbedingungen, welche die Arbeitsleistung bei der Entladung charakterisiren, abhängen, wie die Erwärmungen durch einen gewöhnlichen Batteriestrom, so sind sie ebenfalls dem Quadrate der Elektricitätsmenge q in der Batterie direct und ihrer Oberfläche s umgekehrt proportional. So war z. B. bei Versuchen von Riess [2])

$s =$	3			4			5		
$q =$	10	12	14	10	12	14	12	14	16
ϑ beob. =	13,4	19,4	26,2	10,6	14,0	19,6	12,2	15,1	20,0
ϑ ber. =	13,3	19,2	26,1	10,0	14,4	19,6	11,5	15,7	20,5

[1]) Vergl. Knochenhauer, Wien. Ber. 44, 2, p. 259, 1861*. — [2]) Riess, Reibungselektr. 2, §. 811, p. 269 u. flgde.*; Pogg. Ann. 47, p. 65, 1839*, 50, p. 1, 1840*, 83, p. 309, 1851*.

Die Berechnung geschah nach der Formel $\vartheta = 0{,}4\ q^2/s$.

Bei gleichem Widerstand des Inductionskreises ist die Erwärmung von dem Widerstand des der Induction selbst ausgesetzten Drahtes unabhängig, wie Versuche an einem aus drei Theilen, einem 0,55‴ dicken Kupferdraht und einem 0,29‴ dicken Eisendraht und einem ebenso dicken Kupferdraht beweisen, welche nach einander als Nebendrähte benutzt wurden und deren Widerstände sich wie 1 : 20, 4 : 3,6 verhielten.

Von der Lage des inducirenden Theiles im inducirenden Kreise ist die Wirkung ebenfalls unabhängig, mag er nahe der inneren oder äusseren Belegung der Batterie angebracht sein.

Mit wachsender Länge oder Windungszahl der auf einander inducirend wirkenden Theile, resp. Spiralen der beiden Leitungen nimmt die Erwärmung ϑ in dem Inductionskreise zu, mit wachsender Neigung oder Entfernung e derselben ab.

So war z. B., als zwei gerade Drähte von 10′ 6″ Länge inducirend auf einander wirkten

$e =$	2,71	6,78	11,24	16,01	19,61	23,87
$\vartheta =$	0,21	0,145	0,119	0,081	0,066	0,054
const $\vartheta e =$	569	983	133,7	129,7	129,3	128,9

In weiterer Entfernung ist also die Erwärmung dem Abstand der Drähte nahezu umgekehrt proportional. Bei Spiralen findet ein complicirteres Verhältniss statt, entsprechend der Aenderung des Potentials der inducirenden Theile auf einander bei verschiedenen Entfernungen.

238 Bei den erwähnten Versuchen ändert sich der Verlauf der beiden entgegengesetzten Ströme, aus denen der bei jeder Partialentladung der Batterie inducirte Strom zusammengesetzt ist, nicht wesentlich. Dies tritt aber ein, wenn man die Widerstände in der Leitung des Hauptstromes (R) und des Nebenstromes (r) abändert. Dann sollte ohne diese Einflüsse, wenn die inducirenden Theile unverändert bleiben, die Erwärmung an einer Stelle des inducirten Kreises umgekehrt proportional dem Widerstand des inducirenden und dem des inducirten Kreises sein, welches Gesetz indess in Folge obiger Einflüsse durch die Versuche nicht immer bestätigt wird.

So war I. Aenderung des Widerstandes R im Hauptstrom (ϑ ber. $= 1{,}16/[1 + 0{,}000\,648\,R]$)

$R =$	90	244,9	593,2	910,7	2354	3045
$\vartheta =$	1,16	1,01	0,78	0,70	0,47	0,39
ϑ ber. $=$	1,16	1,00	0,84	0,73	0,46	0,39

II. Aenderung des Widerstandes r im Nebenstrom (ϑ ber. $= 1{,}05/[1 + 0{,}000\,326\,r]$)

---

[1]) Riess, Pogg. Ann. 83, p. 309, 1851*.

r	0	910,3	2354	3045	5639
ϑ	1,05	0,80	0,59	0,49	0,37
ϑ ber.	1,05	0,81	0,60	0,53	0,37

Die Constanten der Formeln für die Berechnung von ϑ wurden je aus der ersten und letzten Beobachtung abgeleitet.

Dabei können indess die oscillatorischen Entladungen ganz wesentlich einwirken.

239 Wie bei den galvanischen Strömen wirken auch die Nebenströme bei der Batterieentladung rückwärts inducirend auf die Hauptleitung und verzögern dadurch die Entladung. Die Erwärmung in der Hauptleitung wird bei wachsendem Widerstand der Nebenleitung erst verringert, und dann wieder vermehrt [1]). Man kann dies schon an dem Entladungsfunken der Batterie erkennen, welcher bei Schliessung der Nebenspirale durch einen schlecht leitenden Draht viel schwächer ist, als wenn sie geöffnet oder durch einen gut leitenden Draht geschlossen ist. Auch kann man in den Kreis des Hauptstromes einen dünnen Eisendraht einschalten, welcher bei der Entladung in den letzten beiden Fällen schmilzt, in dem ersten nicht. Ist die Schliessung der Inductionsspirale durch einen allzu schlechten Leiter, z. B. eine 9″ lange Wassersäule gebildet, so schmilzt der Eisendraht wie bei geöffneter Inductionsspirale.

240 Deutlicher zeigen dies messende Versuche. Wurde z. B. eine Länge l von 0,156‴ dickem Neusilberdraht in den Inductionskreis einer kleinen Inductionsscheibe eingeschaltet, welcher in dem Hauptkreise eine gleiche Spirale in 1 Linie Entfernung gegenüberstand, so betrugen die Erwärmungen in dem in den inducirenden Kreis eingefügten Luftthermometer:

l	0	2,4	9,8	19,7	29,6	39,4	88,7	187,3	285,9	581,7
ϑ	100	81	55	52	48	52	67	71	76	87

Bei geöffneter Inductionsspirale war $\vartheta = 100$ gesetzt.

Bei Ersatz des Neusilberdrahtes durch einen Platindraht von gleichem Widerstand ergeben sich dieselben Resultate, so dass sie, wie zu erwarten, nicht von der Drahtlänge direct abhängen [2]).

Da indess durch den Hauptkreis insgesammt dieselbe Elektricitätsmenge in allen Fällen fliesst, ist die Ablenkung des in demselben eingeschalteten Galvanometers mit und ohne Nebenspirale die gleiche.

241 Alle diese Erscheinungen werden durch die einzelnen Partialentladungen, die Oscillationen der Entladungen und die Zusammengesetztheit der Inductionsströme bei einer jeden derselben in hohem Grade com-

---

[1]) Riess, Pogg. Ann. **49**, p. 393*; Reibel. **2**, §. 844, p. 299*; auch Berl. Monatsber. 1871, p. 95*; Pogg. Ann. **143**, p. 195, 1871*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. **51**, p. 177, 1840*; Reibel. **2**, p. 302, §. 844*; Berl. Monatsber. 1862, p. 343*; Ges. Abh. **1**, p. 287*; auch Pogg. Ann. **143**, p. 195, 1873*.

plicirt. Bei sehr geringem Widerstande des inducirten Kreises verlaufen die Inductionsströme in demselben so schnell, dass ihre Rückwirkung auf den Hauptstrom fast mit den Veränderungen desselben zusammenfällt, die positiven und negativen Schwankungen desselben also in gleicher Weise durch diese Rückwirkung geschwächt werden. Bei grösseren Widerständen des inducirten Kreises verlaufen aber die Inductionsströme in der Nebenspirale und die rückwärts zu den Hauptkreis inducirten Ströme langsamer, so dass bei ihrer Addition zu dem Hauptstrome der ganze Gang des Phänomens geändert wird. Bei zu grossem Widerstand des Inductionskreises verlaufen die Inductionsströme wiederum so langsam, dass die in der Zeiteinheit durch ihre Aenderung in dem Hauptkreise inducirte elektromotorische Kraft sehr gering ist und die primären Ströme nur wenig abzuändern vermag. Zugleich treten die Oscillationen nur bei grösseren Widerständen auf.

242 Wie in den Inductionskreis eingeschaltete geschlossene Inductionsspiralen wirken auch Metallbleche, welche der inducirenden Spirale des Hauptkreises genähert werden, auf den Verlauf des Hauptstromes ein. Auch hier bedarf es aus den angeführten Gründen einer bestimmten, nicht zu guten Leitungsfähigkeit der Bleche zur Erzielung des Maximums der Wirkung. So fand z. B. Riess[1]) folgende für die Einheit der Ladung berechnete Erwärmungen des Luftthermometers im Hauptstrom, als der inducirenden Spirale in demselben auf $2^1/_2'''$ Entfernung gegenüber gestellt wurde:

nichts	Kupferscheibe 0,33 m dick	2 Stanniolblätter	1 Stanniolblatt	Unechtes Silberpapier
100	95	74	57	42

243 Es ist klar, dass ein auf die angeführte Weise durch die Inductionsströme in einer ersten Inductionsspirale B modificirter Batteriestrom, in welchen eine zweite inducirende Spirale C eingeschaltet wird, in einer der letzteren gegenüber gestellten Inductionsspirale D Ströme inducirt, welche jenen Modificationen entsprechen, in Folge deren also ein in ihren Schliessungskreis eingefügter Draht eines Luftthermometers mit wachsenden Widerständen des Kreises der Spirale B erst schwächere, dann wieder stärkere Erwärmungen zeigt u. s. f.[2]).

244 Auch bei verzweigten Schliessungen der Batterie kann man durch Annäherung eines geschlossenen Metallkreises, einer Metallmasse an den einen Zweig die Wärmewirkungen in den Zweigen verändern. So leitete z. B. Riess[3]) zunächst ohne Nebenschliessung den Batteriestrom durch

[1]) Riess, Pogg. Ann. **49**, p. 393*; Reibel. **2**, §. 842, p. 300*; Pogg. Ann. **54**, p. 382*. — [2]) Riess, Reibel. **2**, §. 862, p. 315*. — [3]) Riess, Berl. Monatsber. 1859, p. 1*; Abhandl. **1**, p. 65*; Pogg. Ann. **106**, p. 201, 1859*.

eine Spirale *C* und ein Luftthermometer. Wurde der Spirale *C* eine Inductionsspirale I offen, II durch einen dicken Kupferdraht, III durch einen Platindraht geschlossen gegenüber gestellt und sodann ein zickzackförmiger Draht als Nebenschliessung zu *C* eingefügt und beide Male die Erwärmung untersucht, so ergab sich die für die Einheit der Ladung berechnete Erwärmung im Thermometer:

	I	II	III
ohne Nebenschliessung	91	92	32
mit Nebenschliessung	29	60	—

Danach ist ohne Nebenschliessung durch die Annäherung der Inductionsspirale bei Schliessung derselben mit dem Kupferdraht die Erwärmung fast die gleiche, wie bei Oeffnung derselben; mit Nebenschliessung ist sie durch die geschlossene Inductionsspirale wesentlich verstärkt.

245 Liegen zwei verschiedene Theile der Leitung eines Inductionsstromes einander parallel, z. B. zwei gerade in die Schliessung eingeschaltete Drähte, so wird die Erwärmung in ihrem Kreise vermehrt, wenn der Strom beide Drähte in entgegengesetzter Richtung, vermindert, wenn er sie in gleicher Richtung durchfliesst, indem die Ströme, welche die geraden Drähte auf einander induciren, den direct in der Inductionsleitung inducirten Strömen entgegen oder gleich gerichtet verlaufen und sie so verzögern oder beschleunigen. Wird statt eines U förmig gelegten Drahtes ein kurzer Draht von gleichem Widerstand in die Schliessung eingefügt, so ist die Erwärmung noch grösser, indem die parallelen Drahttheile doch nicht so stark auf einander inducirend wirken, wie wenn sie unmittelbar zusammenfielen [1]).

Dieselben Versuche kann man anstellen, indem man in den Schliessungskreis der Inductionsspirale *B* noch zwei Spiralen *C* und *D* einschaltet, welche man einander gegenüber stellt, so dass einmal der Inductionsstrom beide in gleicher oder entgegengesetzter Richtung durchfliesst.

Aehnlich verhält es sich wie im ersten Falle, wenn ein Theil der Schliessung des Inductionsstromes zu einer ebenen oder auch zu einer cylindrischen Spirale aufgewunden wird.

Dass zwei parallele Ströme sich verzögern, kann man auch zeigen, wenn man direct den Strom der Batterie zwischen drei parallelen Drähten verzweigt, in deren äussere je ein Probeeisendraht eingeschaltet ist und von denen der mittlere dem einen oder anderen der äusseren Drähte genähert werden kann. Der Eisendraht in demselben erglüht in letzterem Falle beim Durchgange des Schlages schwächer [2]).

---

[1]) Riess, Reibel. 2, §. 852 u. f.*; Pogg. Ann. 83, p. 327, 1851*. — [2]) Guillemin, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 27, p. 518, 1872*; Compt. rend. 64, p. 276, 1868*.

246 Aehnliche Erscheinungen kann man auch an längeren geraden Stellen des inducirten Kreises beobachten.

Schliesst man z. B. eine Inductionsspirale B durch einen kurzen Platindraht oder durch einen langen an den Wänden des Zimmers entlang gezogenen Kupferdraht von gleichem Widerstande unter Einfügung eines Luftthermometers, und inducirt in der Spirale einen Strom, indem man derselben eine gleiche Spirale A gegenüber stellt, durch welche die Batterie entladen wird, so ist bei Anwendung des Kupferdrahtes die Erwärmung des Luftthermometers kleiner[1]).

247 Analoge Verhältnisse zeigen sich in tertiären Kreisen. In den Kreis der Batterieentladung sei wiederum eine Spirale A eingeschaltet, durch welche in einer ihr gegenüber gestellten Spirale B inducirte Ströme erzeugt werden. Dieselben mögen eine dritte Spirale C durchlaufen, welche so weit von der Hauptleitung entfernt ist, dass in ihr direct keine merklichen secundären Inductionsströme entstehen. Stellt man dieser Spirale C eine vierte in sich geschlossene Spirale D gegenüber, so werden auch in ihrem tertiären Kreise Inductionsströme durch die secundären Ströme in B und C erzeugt, welche in demselben Arbeit in Form von Wärme, z. B. in dem Drahte eines eingeschalteten Luftthermometers, erzeugen. Durch die Rückwirkung dieser Ströme auf den secundären Kreis wird der Lauf derselben verändert, die Wärmeerzeugung im secundären Kreise modificirt, wodurch auch die Rückwirkung der letzteren auf den primären Kreis sich ändert. Im Allgemeinen werden hierdurch die Abänderungen der Wärmeerscheinungen in demselben durch die secundären Ströme vermindert.

248 Aendert man den Widerstand des tertiären Kreises, so ergeben sich dabei analoge Abweichungen der Erwärmung desselben von der umgekehrten Proportionalität mit der Zunahme des Widerstandes, wie bei der Erwärmung des secundären Kreises[2]). Ebenso ist die Erwärmung des secundären Bogens bei Anwesenheit des tertiären Bogens mit wachsendem Widerstand des letzteren erst kleiner, als ohne denselben, dann nimmt sie wieder zu. Blieb der tertiäre Kreis geöffnet, so erschien bei Versuchen von Riess (l. c.) im Gegensatz zum Verhalten des Hauptstromes gegen den secundären Strom die Erwärmung des secundären Kreises kleiner als bei vollkommener Schliessung der tertiären Spirale, indem die Verzögerung des Stromes in dem secundären Kreise in Folge der Induction der der tertiären Spirale gegenüberstehenden Spirale auf sich selbst durch die Rückwirkung des Stromes in letzterer wieder zum Theil aufgehoben wird.

---

[1]) Riess, Berl. Monatsber. 1862, p. 343*; Abh. 1, p. 287*; Pogg. Ann. 117, p. 417, 1862*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 83, p. 335, 1851*; Reibel. 2, §. 877, p. 328 u. flgde.*

Die Länge des Hauptbogens bedingt auch die Grösse des Minimums der Erwärmung im secundären Strome und die Länge des tertiären Bogens, bei der dasselbe eintritt. Mit wachsendem Widerstand des ersteren ist das Minimum selbst zwar kleiner, aber relativ zu der Erwärmung bei voller Schliessung grösser und tritt erst bei längerer tertiärer Schliessung ein.

Die Verzögerungen und Verminderungen der Wärmewirkung, welche bei der Wechselwirkung paralleler gleichgerichteter, die Vermehrung derselben bei der Wirkung paralleler entgegengerichteter Stromestheile bei den primären Strömen beobachtet wurden, finden bei den Strömen höherer Ordnung in ganz gleicher Weise statt, ebenso ändern sie sich je nach der Aenderung des Potentials der verschiedenen, auf einander wirkenden Theile der einzelnen Leitungen, wenn sie z. B. noch besondere Spiralen enthalten, in denen Extraströme entstehen.

Die Verhältnisse werden indess äusserst complicirt, da jeder dieser Ströme aus zwei entgegengerichteten Theilen besteht, welche beim Anwachsen und Verschwinden des inducirenden Stromes entstehen und sich zu letzterem addiren, der so wieder auf die anderen Leitungen zurückwirkt.

249 Noch viel complicirter werden die Erscheinungen, wenn man zwischen eine in den Hauptkreis der Batterie eingeschaltete inducirende Spirale A und eine in dem secundären Kreise enthaltene Inductionsspirale B eine dritte in sich geschlossene Spirale C bringt. Sowohl in B wie in C werden durch den Strom in A Inductionsströme erzeugt, von denen der in B in C, sowie der in C in B tertiäre Ströme erzeugt und ebenfalls mit diesen auf A rückwärts inducirend wirkt. Bei jeder einzelnen Versuchsanordnung müssen sich hierbei andere Verhältnisse ergeben, die sich eventuell durch die Rechnung verfolgen lassen [1]).

Ersetzt man den geschlossenen Leiter durch ein Metallblech, so schwächt es im Allgemeinen um so mehr die Wirkung des Nebenstromes, je dicker es ist und je besser es leitet; wird es radial durchschnitten, so kann man an den in der Schnittfläche auftretenden Funken die in ihm inducirten Ströme erkennen. Je nach der Lage u. s. f. kann das Metallblech hierbei mehr auf den Nebenstrom oder mehr auf den Hauptstrom zurückwirken, so dass sich ganz verschiedene Resultate ergeben können.

Dass dabei in der That die Inductionswirkung der Spirale, resp. der Metallbleche den Gang des Nebenstromes ganz anders modificirt als eingeschaltete Widerstände, kann man zeigen, wenn man in die Schliessung des Nebenstromes Widerstände einschaltet und seine Wärmewirkung dadurch ebenso weit vermindert, wie durch den Einfluss der Spirale C. Die Erwärmung im Hauptstrome wird dadurch bei richtig gewählten Verhältnissen statt vergrössert, im Gegentheil geschwächt.

---

[1]) Vergl. Riess, Pogg. Ann. **83**, p. 319, 1851*; Berl. Monatsber. 1872, p. 38*; Pogg. Ann. **149**, p. 359, 1873*; Abh. **2**, p. 126 u. flgde.*

250 Auch zwei Inductionsströme gleicher Ordnung können bei gegenseitiger Beeinflussung ihren beiderseitigen Verlauf ändern.

Man bringt vor zwei in den Schliessungskreis der Batterie eingefügte Spiralen A und B zwei Inductionsspiralen C und D, welche mit zwei anderen Spiralen E und F verbunden sind. Stellt man letztere Spiralen einander gegenüber, so wirken sie wiederum auf einander tertiär inducirend. Bestimmt man die Wärmewirkung in einem der secundären Kreise, so wächst sie, wenn die Nebenströme in den einander benachbarten Theilen von E und F einander entgegenlaufen. Sie nimmt im gegentheiligen Falle ab. Im ersten Falle addiren sich die tertiären Ströme zu den secundären, im zweiten subtrahiren sie sich von ihnen [1]).

251 Bei allen diesen und ähnlichen Versuchen kann man an Stelle des Thermometers ein Elektrodynamometer in die Schliessungskreise einfügen, wobei indess die Isolation der Windungen durch Umhüllung des Drahtes mit Kautschuk u. s. f. besonders sorgfältig hergestellt sein und Sorge getragen werden muss, dass nirgends seitliche Uebergänge der Elektricität stattfinden.

Ist die durch das Elektrodynamometer in der Zeiteinheit dt hindurchgehende Elektricitätsmenge q, so ist die die Ablenkung der beweglichen Rolle bewirkende Kraft während der ganzen Entladung gleich $const \int_0^\infty q^2 dt$, während die gesammte, entladene Elektricitätsmenge $Q = const \int_0^\infty q\,dt$ ist. Die Angaben des Elektrodynamometers hängen also ganz von dem zeitlichen Verlaufe der Entladung ab, welcher noch dadurch beeinflusst wird, dass in den Spiralen desselben selbst bei der Entladung abwechselnd gerichtete Inductionsströme erzeugt werden, welche den zeitlichen Verlauf des hindurchgeleiteten Entladungsstromes secundär abändern, event. in der Schliessung oscillatorische Strömungen veranlassen können. Da aber in der die Ablenkung bestimmenden Formel q im Quadrat vorkommt, so ist die Ablenkung von der Strömungsrichtung unabhängig. Somit werden auch die Angaben des Elektrodynamometers für Batterieströme von den secundären Umständen in hohem Grade beeinflusst.

252 Leitet man den Entladungsschlag hinter einander durch ein Galvanometer und ein Dynamometer, so kann man nach Bd. III, §. 60 aus den Ausschlägen g und d der beiden Apparate die Entladungszeit z bestimmen, da $z = const\, g^2/d$ ist. So schaltete W. Weber in die Schliessung einer Batterie von 16 Quadratfuss Belegung die erwähnten beiden Appa-

---

[1]) Riess, Berl. Monatsber. 1871, p. 95*; Pogg. Ann. 143, p. 595*; Abh. 2, p. 138*.

rate und 3,1 Linien dicke feuchte Hanfschnüre von verschiedener Länge l ein. Er fand bei der Entladung:

$l =$	2000	1000	500	250	250	500	1000	2000
$g =$	79,9	76,6	82,3	87,3	82,9	95,6	95,8	101,5
$d =$	65,6	153,0	293,8	682,0	609,1	422,8	210,1	98,0
$g^2/d =$	97,3	38,3	23,0	11,2	11,3	21,6	43,7	105,0

Hieraus folgt im Mittel:

$l =$	1	2	4	8
$const\ z =$	11,3	22,3	41,0	101,1
$const\ z/l =$	11,3	11,1	10,2	12,6

Die Entladungszeiten sind der Länge der Hanfschnüre nahe proportional. Der Verlauf der Entladung war also bei den Versuchen nahe der gleiche [1]). Wurden die Messungen auf absolutes Maass reducirt, so ergab sich die Zeit zum Durchlaufen einer Hanfschnur von 6′ Länge gleich 0,085 Secunden.

253 Die in dem Vorhergehenden im Allgemeinen besprochene Aenderung der Stromesdichtigkeit durch die secundären Inductionswirkungen lässt sich ausser durch die thermischen und elektrodynamischen Wirkungen auch durch die galvanometrischen Wirkungen der Ströme nachweisen, wenn man in die Schliessungskreise ein Galvanometer und ein elektrisches Ventil einschaltet, welches überwiegend nur in einer Richtung Ströme hindurchlässt, und zwar, wenn ihre Dichtigkeit sinkt, nur bis zu einer bestimmten unteren Grenze derselben.

Wird z. B. im Hauptstrome die Elektricitätsmenge der Batterie geändert, wobei die Dichtigkeit durch Vermehrung der Flaschenzahl constant erhalten wird, so ist auch die Ablenkung der Galvanometernadel durch den Nebenstrom bei Einschaltung eines Ventils, welches nur die dem Hauptstrome gleichgerichteten oder nur die ihm entgegengerichteten Ströme hindurchlässt, proportional der Elektricitätsmenge [2]). Aendert sich aber mit gesteigerter Elektricitätsmenge auch die Dichtigkeit in der Batterie, so nehmen die Ausschläge durch den dem Hauptstrome gleichgerichteten, durch das Ventil gehenden Theil des Nebenstromes etwas schneller zu als erstere, ebenso nehmen dieselben ab, wenn die Entladung der Batterie durch Einschaltung von grösseren Widerständen in den Hauptkreis oder durch Einschaltung einer Spirale in denselben und eines derselben genäherten Blattes unechten Silberpapiers verzögert wird. Die Nebenströme erhalten dann nicht mehr die gehörige Dichtigkeit, um das Ventil zu durchbrechen. Wird der Nebenstrom selbst verzögert, indem grössere Widerstände in seinen Kreis eingeschaltet werden, so nimmt ebenfalls der Ausschlag des in seinen Kreis zugleich mit einem Ventil

[1]) W. Weber, Elektrodyn. Maassbestimmungen, 1, p. 84*. — [2]) Riess, Abh. 1, p. 338*; Pogg. Ann. 124, p. 252, 1865*.

eingeschalteten Galvanometers ab, ebenso wenn einzelne Theile desselben einander parallel gestellt und in gleicher Richtung vom Strom durchflossen sind und somit inducirend auf einander wirken; er wächst, wenn der Strom sie in entgegengesetzter Richtung durchfliesst.

254 Die physiologischen Wirkungen der Batterieentladung und der Nebenströme hängen, wie die der galvanischen Inductionsströme, von der Aenderung der Dichtigkeit derselben in der Zeiteinheit ab.

Dies hat Dove[1]) vermittelst des Differentialinductors bewiesen. Zwei neben einander liegende, hohle Holzröhren von $18^1/_2$ Linien innerem Durchmesser, Fig. 67, wurden in ganz gleicher Weise mit je 80

Fig. 67.

Windungen eines $^1/_2$ Linien dicken, lackirten Kupferdrahtes umwunden. Sie wurden hinter einander in den Schliessungskreis einer Batterie eingeschaltet. Auf diese beiden inducirenden Spiralen wurden gleiche

[1]) Dove, Abhandl. d. Berl. Akad. 1841, p. 124*; Pogg. Ann. 49, p. 72, 1840*.

Rollen aufgeschoben, welche aus je 45 Fuss auf eine Papprõhre gewundenem Kupferdraht hergestellt und so verbunden waren, dass die beim Oeffnen oder Schliessen des inducirenden Stromes in ihnen erzeugten Inductionsströme einander entgegenflossen. Die anderen Enden der Rollen wurden durch Handhaben mit den Händen oder mit einem Luftthermometer verbunden. Beide Spiralenpaare waren auf Glasgabeln gelegt.

Auch hier schwächt das Einlegen unmagnetischer Metalle die physiologische Wirkung der Spiralen, und zwar um so mehr, je besser die Metalle leiten (Antimon, Wismuth, Blei weniger als Kupfer und Messing). Massive Stäbe wirken stärker schwächend, als nicht massive Stäbe, eine geschlossene Metallröhre stärker als eine der Länge nach aufgeschlitzte. Massive magnetische Stäbe von verschiedenen Eisensorten, geschlossene Flintenläufe schwächen die physiologische Wirkung des Inductionsstromes, ebenso Säulen von Eisenblechen, während aufgeschnittene Flintenläufe, Bündel von gefirnissten Eisendrähten dieselbe verstärken. Hier wirkt die die Inductionsströme in der Inductionsspirale verstärkende Magnetisirung der Eisenkerne entgegen den dieselben schwächenden, in ihrer Masse erzeugten inducirten Strömen. In den Drahtbündeln und aufgeschlitzten Eisenkernen können letztere nicht zu Stande kommen, in den massiven Stäben überwiegt ihre Wirkung die der Magnetisirung.

Dabei geht die thermische Wirkung indess nicht mit der physiologischen parallel. Wurden z. B. in die Spiralen I, II des Differentialinductors die folgenden Körper eingelegt, so betrug die thermische (ϑ) und die physiologische (p) Wirkung der Differenz der Ströme der gegen einander verbundenen Inductionsspiralen:

I	II	ϑ	p
100 Eisendrähte	100 Eisendrähte	0	0
0	100 Messingdrähte	1,5	0
100 Messingdrähte	100 Eisendrähte	8,9	stark
0	desgleichen	9,3	stark
0	Messingröhre	10,1	schwach
100 Eisendrähte	desgleichen	14,1	sehr stark

Die magnetischen Wirkungen, so wie die Funkenentladung der Nebenströme werden wir in den betreffenden Capiteln behandeln.

c. Nebenbatterie.

255 Aeusserst complicirte Verhältnisse treten ein, wenn man in den Schliessungskreis eines Drahtes, in welchem durch die Entladung der Batterie Inductionsströme erregt werden, eine zweite Batterie, die Nebenbatterie einschaltet.

Jeder der Inductionsströme in dem Nebendraht, welche schon ohnehin durch die Oscillationen im Hauptkreise zahlreich sein können, ladet die Nebenbatterie, welche sich wieder rückwärts durch die Nebenleitung entladet und theils in dieser selbst, theils auch in dem primären Schliessungskreise der „Hauptbatterie" inducirte Ströme erzeugt, welche wiederum Ladungen der Nebenbatterie bedingen.

Einfache Verhältnisse sind demnach bei Versuchen über die Erwärmungsgesetze in der Haupt- und Nebenleitung nicht zu erwarten und eine Verfolgung der Erscheinungen über die einfachsten Verhältnisse hinaus ist zwecklos, um so mehr, als die Grundprincipien der Erscheinungen vollständig feststehen. Für die einfachsten Fälle hat nach vielen leider ziemlich unklaren Versuchen von Knochenhauer und mehreren Beobachtungen von Riess namentlich Blaserna empirische Formeln aufgestellt. Wir begnügen uns mit Angabe der Hauptresultate.

256 Zunächst findet Riess [1]) bei Einschaltung eines kleinen Condensators, z. B. einer Leydener Flasche, in den Inductionskreis, eine sehr viel kleinere Erwärmung desselben wie ohne Condensator (w_0), dann bei wachsender Grösse des Condensators eine bis über w_0 hinausgehende Erwärmung, indem der Strom hin und her geht und beim weiteren Durchgang durch das Thermometer den erwärmten, also schlechter leitenden Draht durchströmt. Bei constanter Zahl der Condensatorflaschen nimmt mit wachsender Zahl der Batterieflaschen bei gleicher Ladung die Erwärmung im Inductionskreise ab, umgekehrt nimmt mit constanter Zahl der Batterieflaschen und zunehmender Zahl der Condensatorflaschen die Erwärmung im Inductionskreise zu. — Diese Inductionsströme wirken dann ebenfalls auf den Hauptstrom zurück, so dass er mit Vergrösserung des Condensators im Inductionskreise, wo der Inductionsstrom schneller verläuft, auch stärker verzögert und sein Kreis weniger erwärmt wird und zwar bei wachsender Grösse der Condensatoren zunehmend weniger, als bei voller Schliessung des Inductionskreises.

257 Nach Knochenhauer [2]) wächst 1) die der Quadratwurzel aus der Erwärmung eines Drahtes im Luftthermometer proportional gesetzte

---

[1]) Riess, Abh. 1, p. 239*; Berl. Monatsber. 1853, p. 607*; Pogg. Ann. 91, p. 355, 1854*. — [2]) Knochenhauer, Wien. Ber. 22, p. 333, 1857*; vergl. ibid. 34, p. 77, 1859*. Ausser den erwähnten Abhandlungen von Knochenhauer

Intensität des Nebenstromes mit Verlängerung des Nebendrahtes bis zu einem Maximum und nimmt dann wieder ab. 2) Das Maximum tritt ein, wenn sich die Länge des Hauptdrahtes zu der des Nebendrahtes verhält wie die Anzahl der Flaschen der Nebenbatterie zu der der Hauptbatterie. 3) Sind die Batterien gleich, so zeigt sich also das Maximum, wenn Haupt- und Nebendraht gleich sind. Die Maxima selbst verhalten sich umgekehrt wie die Hauptdrähte.

258 Blaserna[1]) lud eine Batterie von 1 bis 6 Flaschen, deren Capacitäten mit einander verglichen waren, bis sie sich durch eine Funkenstrecke entlud. Neben einem 12 Fuss langen Theil der Hauptschliessung befand sich ein paralleler Theil der Nebenschliessung, in welche die Nebenbatterie und ein Luftthermometer eingeschaltet war.

Zunächst bestätigten sich die Resultate von Knochenhauer. Dann ergaben sich folgende Sätze.

Bezeichnet man die Längen des Hauptdrahtes und Nebendrahtes mit h und n, die Oberflächen der Haupt- und Nebenbatterie mit s und s_1, sind q und q_1 die Stärken der einzelnen Flaschen, d. h. die Ladungen für welche dieselben in gleichem Schliessungskreise gleiche Wärmemengen ϑ erzeugen ($\vartheta = const\, q^2/s$, also cet. par. $q = b\sqrt{\vartheta}$, wo b eine Constante ist), ist F die Schlagweite der Hauptbatterie, so ist mit Hinzunahme des Satzes 3 von Knochenhauer die Erwärmung ϑ_1 an einer Stelle des Nebenstromes

$$\vartheta_1 = \frac{q_1}{q}\,\frac{s}{\sqrt{s_1}}\,\frac{1}{h}\,\frac{b}{A_1\left(h - \frac{q_1^2}{q^2}\frac{s}{s_1}\,n\right) + 1}\cdot\sqrt{F^3} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

wo A_1 und b Constante sind; A_1 von der Distanz und der Länge der auf einander wirkenden inducirenden Theile der Leitungen, resp. von der Feuchtigkeit der Luft abhängt.

Zunächst wurde die Abhängigkeit der Erwärmung von n, sowie von h bei constanten Anzahlen der Flaschen beider Batterien geprüft; dann bei verschiedenen Zahlen die Abhängigkeit von s und s_1. Die Erwärmung erreicht cet. par. ein Maximum M, wenn $h - q_1^2 s n / q^2 s_1 = 0$ ist. Setzen wir diesen Werth in Formel 1) ein und $q_1^2 s / q^2 s_1 = k$, so wird auch sehr annähernd

$$\vartheta_1 = \frac{M}{1 + A_1(h - kn)^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,a)$$

---

siehe auch die folgenden, welche leider meist keine klaren Resultate geben: Grunert's Arch. **19**, p. 53, 97, 1852*, **20**, p. 113, 1853*; Wien. Ber. **10**, p. 219, 1853*; Pogg. Ann. **90**, p. 189, 1853*; Wien. Ber. **15**, p. 113, 1855*; Wien. Ber. **18**, p. 143, 1856*; Pogg. Ann. **97**, p. 260, 1856*; Wien. Ber. **27**, p. 207, 1858*; Wien. Ber. **33**, p. 163, 1858*; Wien. Ber. **34**, p. 77, 1859*; Wien. Ber. **45**, p. 229, 1862*; Wien. Ber. **46** [2], p. 138, 1863*; Pogg. Ann. Ergzbd. **5**, p. 146, 1870*; Beiträge zur Elektricitätslehre 1854*.

[1]) Blaserna, Wien. Ber. **33**, p. 25, 1858*.

Sind Haupt- und Nebenbatterie aus ganz gleich gestalteten Flaschen zusammengesetzt, so ist für beide Batterien, wenn die Flaschenzahlen μ und ν sind, $q = \alpha\mu$, $q_1 = \alpha\nu$; $s = \beta\mu$, $s_1 = \beta\nu$, wo α und β die Einheit der Ladung und der Oberfläche angeben; daher im Fall des Maximums $h:n = \nu:\mu$, entsprechend dem Satz 2 von Knochenhauer.

Die Abhängigkeit der Erwärmung ϑ_1 von der Schlagweite F wurde untersucht, während ϑ_1 im Maximum war. Die Proportionalität mit $\sqrt[2]{F^3}$ gilt nur für nicht zu grosse Werthe von F; bei grösseren Schlagweiten ist $\vartheta = const \sqrt[2]{F}(1 + \lambda F + \lambda_1 F^2)$ zu setzen, wo λ, λ_1... Constante sind.

Auch Knochenhauer hat die Formel 1a) an seinen Versuchen bestätigt.

259 Die Erwärmung ϑ des unveränderlichen Hauptdrahtes [1]) besitzt, wie ohne Nebenbatterie, bei wachsender Länge n des Nebendrahtes ein Minimum, von dem aus mit abnehmender oder steigender Länge n die Erwärmungen ϑ sich asymptotisch einem Maximum nähern. Während ohne Nebenbatterie bei den beiderseitig erfolgenden Aenderungen von n die Aenderungen der Erwärmung des Hauptstromes nicht gleichmässig [2]) verlaufen, ist die die Erwärmungen des Hauptdrahtes mit Nebenbatterie darstellende Curve vom Maximum an symmetrisch. Diese Curve lässt sich durch dieselbe Formel, wie die Erwärmung im Nebenstrom darstellen. Ist Θ die Grenze, welcher sich die Werthe von ϑ für $n = 0$ und $n = \infty$ nähern, M_1 das Minimum der Erwärmung, k das Verhältniss des Hauptdrahtes zum Nebendrahte bei dem Minimum, so ist

$$\vartheta = \Theta - \frac{\Theta - M_1}{1 + A(h - kn)^2},$$

wo wiederum $k = q_1^2/q^2 . s/s_1$ ist. Der Werth Θ selbst ist $\Theta = Cq^2/s$, wo C eine Constante ist.

Für $h - kn = 0$ ist $k = h/n$ das Verhältniss des Hauptdrahtes zum Nebendraht beim Minimum der Erwärmung.

Der Minimalwerth M_1 ergiebt sich, wenn C_1 eine neue Constante ist:

$$M_1 = C_1 \frac{q^2}{q_1} \frac{\sqrt{s_1}}{s},$$

so dass die allgemeine Formel wird:

$$\vartheta = C\frac{q^2}{s} - \frac{C\frac{q^2}{s} - C_1 \frac{q^2}{q_1}\frac{\sqrt{s_1}}{s}}{1 + A\left(h - \frac{q_1^2}{q^2}\frac{s}{s_1} n\right)^2}.$$

---

1) Blaserna, Mach und Peterin, Wien. Ber. 37, p. 477, 1859*. — 2) Riess, Pogg. Ann. 51, p. 180, 1840*.

260 Aus ganz ähnlichen Versuchen, bei denen gleichzeitig die Erwärmung im Hauptdraht und im Nebendrahte beobachtet wurde, folgerte Knochenhauer[1]), dass das Verhältniss zwischen ϑ und ϑ_1 durch die Formel

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta} = \frac{(M)}{1 + (A)(h - kn)^2}$$

auszudrücken sei, wo (M) und (A) neue Constante sind. Setzt man in den Formeln $M_1/M = (M)$ und $A\Theta/M + A_1 - A = (A)$, so lässt sich aus den obigen Gleichungen für ϑ_1 und ϑ diese Relation ableiten.

261 Zwischen (A) und A besteht nach Blaserna[2]) die Beziehung $(A) = A\Theta/M$, woraus dann unmittelbar folgt $A = A_1$. Die von Knochenhauer[3]) angeführten Zahlenwerthe bestätigen diese Beziehung.

Da die Gesammterwärmung des inducirenden und inducirten Drahtes stets $\Theta = C\, q^2/s$ sein muss, so folgt daraus, dass in allen Fällen

$$\vartheta + C_{II}\vartheta_1 = \Theta$$

ist, wo C_{II} eine neue Constante ist, die von der Natur der Leitung abhängt. Die Vergleichung der Beobachtungen Knochenhauer's bestätigen auch diese Relation.

Für das Maximum M_1 oder Minimum M der Erwärmung des Nebenstromes und Hauptstromes gilt also ebenfalls

$$M + C_{II}M_1 = \Theta,$$

woraus

$$C_{II} = \frac{\Theta - M}{M_1}$$

folgt.

Aendert sich die Funkenlänge im Hauptkreise, so ändert sich C_{II} kaum[4]). Ebenso bleibt C_{II} bei Aenderung des Abstandes und der Länge der auf einander inducirend wirkenden Drähte, so wie der Zahl der Flaschen der Nebenbatterie unverändert[5]).

III. Freie Spannung an den Enden der Inductionsrollen bei der Voltainduction. Oscillatorische Entladungen in denselben.

262 Schon §. 10 haben wir erwähnt, dass zwischen den einander genäherten Enden einer Inductionsrolle, in welcher durch Schliessen und Oeffnen des Stromes in einer in dieselbe eingeschobenen inducirenden

[1]) Knochenhauer, Wien. Ber. 34, p. 81, 1859*. — [2]) Blaserna, Wien. Ber. 36, p. 209, 1859*. — [3]) Knochenhauer, Wien. Ber. 34, p. 77, 1859*. — [4]) Blaserna, Mach und Peterin, l. c. — [5]) Odstrcil und Studnicka, Wien. Ber. 41, p. 302, 1860*.

Spirale Ströme inducirt werden, Funken überspringen können. Deutlicher zeigen sie sich, wenn man in die Rollen einen Eisenkern einlegt. Diese Versuche können am besten mit einem Inductorium angestellt werden. Sie zeigen, dass sich bei der Induction an den Enden der geöffneten Inductionsrolle freie Elektricitäten anhäufen, welche sich bei genügender Dichtigkeit durch die zwischen ihnen befindliche Luftstrecke ausgleichen können.

263 Die freien Elektricitäten an den Enden der geöffneten Inductionsspirale sind direct von Masson und Breguet und namentlich von Sinsteden nachgewiesen worden.

Masson und Breguet[1]) haben zu ihren Versuchen eine aus zwei gleichen Kupferdrähten von je 650 m Länge gewundene Doppelspirale verwendet. Durch einen Commutator, ähnlich wie die Theil I, §. 323 beschriebenen, wurde durch den einen Draht der Spirale wiederholt der Strom einer starken Säule geleitet und derselbe geöffnet. Die Enden des anderen Drahtes, in welchem bei diesem Verfahren abwechselnd gerichtete Ströme inducirt wurden, konnten mit den Belegungen eines Condensators in Verbindung gesetzt werden. Durch einen zweiten Commutator, welcher auf dieselbe Axe, wie der im Stromkreise des inducirenden Stromes befindliche, aufgesetzt war, konnte bewirkt werden, dass nur die bei der Oeffnung oder nur die bei der Schliessung des inducirenden Stromes inducirten Ströme zu dem Condensator gelangten.

Wurde, während das eine Ende des inducirten Drahtes fest mit der oberen Belegung des Condensators verbunden war, das andere Ende der unteren Belegung des letzteren genähert, so sprangen Funken über. Die im Condensator angehäuften Elektricitäten entsprachen völlig der Richtung des inducirten Stromes. — Die bei der Schliessung des primären Stromes inducirten Ströme zeigten viel schwächere Ladungen, als die Oeffnungsströme.

Wurde eine inducirende Spirale AB mit einer zweiten, geöffneten Inductionsspirale $A_1 B_1$ umgeben, die Verbindung der correspondirenden Enden A und A_1 oder B und B_1 mit den Händen durch Handhaben hergestellt und nun der Stromkreis von AB geöffnet, so erhielt man keine Erschütterung; wohl aber, wenn man die Enden A und B_1 oder A_1 und B mit den Händen verband. Diese Enden würden auch, in Folge des Inductionsstromes in AB und des Extrastromes in $A_1 B_1$, den Belegungen eines Condensators entgegengesetzte Ladungen ertheilen können.

264 Lässt man die Enden des inducirten Drahtes der später zu beschreibenden Inductorien isolirt von einander, so giebt jedes Ende für sich mit dem Finger berührt einen Funken, welcher seine elektrische Ladung bekundet; ist das eine Ende abgeleitet, so ist der Funken, wel-

[1]) Masson und Breguet, Ann. de Chim. et de Phys [3] 4, p. 129, 1842*.

chen man aus dem isolirten Ende ziehen kann, viel stärker, indem jedesmal die durch die Induction in der inducirten Spirale erzeugte elektromotorische Kraft, wie in einem gewöhnlichen Hydroelement, die Differenz der elektrischen Dichtigkeiten an beiden Enden der Inductionsspirale constant erhält.

Berührt man nach Sinsteden[1]) bei einem Inductionsapparat, dessen Inductionsspirale aus vielen über einander liegenden, je ihrer ganzen Länge nach gewundenen Windungsreihen besteht, das äusserste Ende der obersten Windungsreihe der Inductionsspirale und irgend eine Stelle der inducirenden Spirale oder des in ihr liegenden Eisenkernes mit den Händen, so erhält man einen Schlag, indem die Elektricität, welche am inneren, der inducirenden Spirale und dem Eisenkern zunächst liegenden Ende der inducirten Spirale angehäuft ist, die ungleichnamige Elektricität in dem ihr benachbarten Körper bindet und die gleichnamige frei macht, welche sich dann mit der ungleichnamigen Elektricität des äusseren Endes der inducirten Spirale ausgleicht. Verbindet man dagegen das innere Ende der inducirten Spirale mit jenen Stellen durch die Hände, so kann man keinen Schlag erhalten, da beiderseits gleichnamige Elektricitäten angehäuft sind. — Nur wenn die inducirende Spirale lang ist, und in ihr beim Oeffnen Extraströme entstehen, welche ihre Enden mit entgegengesetzten Elektricitäten laden, kann man bei Verbindung des einen oder anderen ihrer Enden mit dem inneren Ende der inducirten Spirale eine Erschütterung wahrnehmen.

Auch als Sinsteden zwischen die inducirende und die inducirte Spirale ein Stanniolblatt zwischenschaltete, welches zwischen zwei stark gefirnisste Papierblätter eingelegt war, und um die inducirte Spirale gleichfalls erst ein gefirnisstes Papierblatt und dann ein Stanniolblatt wickelte, erhielt er, als beide Stanniolblätter mit zwei isolirten, einander gegenüberstehenden Drahtspitzen verbunden waren, zwischen denselben beim abwechselnden Oeffnen und Schliessen des inducirenden Stromes eine Reihe von lebhaften Funken, indem die an den Enden der Inductionsspiralen angehäuften Elektricitäten in den Stanniolblättern die entgegengesetzten Elektricitäten durch Influenz vertheilten, und die ihnen gleichnamigen Elektricitäten derselben sich durch die Spitzen ausglichen.

265 An der Magnetelektrisirmaschine hat Sinsteden[2]) ebenfalls Spannungserscheinungen beobachtet. Er isolirte den Magnet einer starken Saxton'schen Maschine (s. w. u.) mittelst untergelegter Gummiplatten, bedeckte die Pole des Magnetes und den Anker mit Wachstaffent und Schellack, und stellte die Federn, welche auf dem mit den Enden der Inductionsrollen verbundenen Commutator schleiften, auf 3 Zoll hohe, mit Schellack lackirte Glasfüsse. Die Federn waren, wie bei dem Stöhrer'schen Apparat (s. w. u.), gespalten, so dass der Strom in der zwischen

[1]) Sinsteden, Pogg. Ann. 69, p. 361, 1846*; 85, p. 465, 1852*. — [2]) Sinsteden, Pogg. Ann. 69, p. 353, 1846*.

ihnen eingeschalteten Leitung eine gleiche, durch ein Galvanometer bestimmte Richtung behielt. Es wurde nun ohne directe Verbindung der Federn ein an der einen derselben befestigter Metallknopf isolirt, und der mit der anderen verbundene Metallknopf mit einem Elektroskop berührt. Dasselbe zeigte an dem als positiver Pol der Inductionsspirale dienenden Knopf positive, an dem anderen Knopf negative Elektricität. Bei der Ableitung des einen der beiden Knöpfe zeigte der andere eine viel bedeutendere Ladung als vorher. — Auch der Stahlmagnet der Maschine hatte eine, der Elektricität des nicht abgeleiteten Knopfes gleichnamige Ladung erhalten, indem die in jenem Knopf angehäufte Elektricität im Magnet eine ihr entsprechende Menge ungleichnamiger Elektricität zu sich hinzog und dagegen eine ebenso grosse Menge gleichnamiger Elektricität in Freiheit setzte.

Wurde durch eine geeignete Federverbindung bewirkt, dass zunächst die Inductionsspiralen in sich geschlossen, dann aber in einem bestimmten Moment geöffnet wurden, in welchem sich in ihnen ein Oeffnungsextrastrom bilden würde, so zeigten in diesem Moment die mit ihren Enden verbundenen Metallknöpfe viel stärkere Spannungserscheinungen, und schon jeder derselben für sich gab, selbst wenn der andere isolirt blieb, Funken und physiologische Wirkungen. Auch der Stahlmagnet erhielt bedeutendere Spannungen.

Wurden beide Knöpfe unter einander metallisch verbunden, so beobachtete man an dem Apparate gar keine freie Spannungselektricität.

266 Verbindet man die Enden der Inductionsrolle eines Inductoriums durch eine wenige Zolle lange, mit angesäuertem Wasser befeuchtete Hanfschnur, so kann man nach Poggendorff[1]) ebenfalls mittelst des Elektroskops beim Oeffnen des inducirenden Stromes auf ihrer Oberfläche freie Elektricitäten nachweisen. Indess schon längere gerade oder zickzackförmige Drähte (30 m eines 0,66 mm dicken Platindrahtes), welche zu dieser Verbindung gebraucht werden, zeigen diese Ladung nicht mehr. Verbindet man dagegen die Enden der Inductionsrolle eines Inductoriums unter Einschaltung langer Drahtrollen (von 100 bis 150 m Kupferdraht von 0,66 mm Dicke, welcher weniger als die Hälfte des Widerstandes jenes Platindrahtes hat) metallisch mit einander, so zeigt der Schliessungsdraht bedeutende Spannungserscheinungen, man kann aus demselben Funken ziehen u. s. f. Diese Spannungserscheinungen treten nur beim Oeffnen der inducirenden Spirale auf. Durch ein Elektroskop kann man bei Einschaltung zweier Drahtrollen nachweisen, dass die Ladung des Drahtes an der Seite des für den Oeffnungsstrom positiven Poles des Inductoriums positiv, an der entgegengesetzten Seite negativ ist, in der Mitte sich aber ein Indifferenzpunkt befindet. Bei Einschaltung von Eisendrahtbündeln in die Rolle

[1]) Poggendorff, Pogg. Ann. 121, p. 307, 1864*.

nehmen die Spannungserscheinungen zu. An Stelle der eingeschalteten Drahtrolle kann man einen Theil der Inductionsrolle des Inductoriums selbst verwenden, indem man nur die inducirende Rolle mit dem Eisenkern aus derselben ein Ende herauszieht. Bei metallischer Verbindung der Enden der Inductionsrolle durch einen Draht erscheint auf denselben freie Elektricität, welche beim Einschieben der inducirenden Rolle wieder verschwindet.

Auch wenn man zwei gleiche Inductorien (die beiden äusseren Abtheilungen eines dreitheiligen Inductoriums) entgegengesetzt mit einander verbindet, geben die Verbindungsdrähte Funken. Bei gleichsinniger Verbindung erscheinen sie nicht.

Verbindet man zwei Inductorien von verschiedener Grösse entgegengesetzt mit einander und lässt nur je eines von ihnen wirken, so ist die freie Spannung grösser, wenn das kleinere erregt wird und das grössere als eingeschaltete Drahtrolle dient.

Sehr deutlich zeigen sich diese Erscheinungen in verdünnter Luft. Wird das Inductorium durch eine besondere Drahtrolle und einen unter der Glocke der Luftpumpe bogenförmig ausgespannten Schliessungsdraht geschlossen und die Luft evacuirt, so wird die Ladung des letzteren sichtbar; er leuchtet hell auf und sendet Lichtstrahlen gegen die Glocke, namentlich, wenn sie dem Draht gegenüber mit Stanniolstreifen beklebt ist. Dabei ist indess das Leuchten des Drahtes unstet und das Licht wechselt oft seine Stelle. Einlegen von Eisendrahtbündeln in die Drahtrolle steigert auch hier die Lichterscheinung. Besonders hell erscheint das Licht, wenn man ausserhalb der Glocke den Kreis des Inductionsstromes noch an einer Stelle unterbricht, an welcher Funken überschlagen.

Diese starken Spannungserscheinungen sind jedenfalls durch den Extrastrom bedingt, welcher in den in den Schliessungskreis des Inductoriums eingeschalteten Rollen erzeugt wird und dem ursprünglichen Inductionsstrome entgegengerichtet ist.

Bei Verbindung der Pole der Inductionsrolle mit den Belegungen einer Leydener Flasche nimmt das Leuchten in Folge der verminderten Spannung an dem Draht ab.

Man kann die Spannungserscheinungen auf der Oberfläche des geschlossenen Inductionsstromes auch in der Weise zeigen, dass man die Enden der Inductionsrolle eines Ruhmkorff'schen Apparates durch einen verhältnissmässig sehr langen Draht schliesst, und nun zwei Punkte desselben mit den beiden Spitzen eines Funkenmikrometers verbindet. Während bei Verbindung der Enden der Inductionsrolle selbst mit letzteren die Schlagweite durch Einschaltung jenes langen Drahtes kaum abnimmt, vermindert sie sich immer mehr, je näher die Ableitungspunkte des Drahtes zum Mikrometer an einander liegen [1]).

---

[1]) Koosen, Pogg. Ann. **107**, p. 212, 1859*.

267 Die an den Enden einer geöffneten Inductionsrolle auftretende Potentialdifferenz ist denselben Bedingungen unterworfen, wie die in ihr erzeugte elektromotorische Kraft. Sie ist also proportional dem Product der Zahl der Windungen der inducirenden und inducirten Spirale, der Intensität des inducirenden Stromes und abhängig von der Veränderung der Lage der Spiralen, resp. ihrer relativen Geschwindigkeit.

Zum Beweise hierfür bediente sich Donati[1]) des Interruptors von Felici (§. 128), an dessen Hebel unterhalb ein verticales Pendel angeschraubt war. An der Stange des letzteren war eine 8 mm hohe, auf einem Ebonitringe gewundene Inductionsspirale von 5 bis 200 Windungen befestigt, einmal mit den Windungen in einer mit der Schwingungsebene zusammenfallenden Verticalebene, so dass sie bei den Oscillationen des Pendels sich entweder zwischen den Polen eines Ruhmkorff'schen Magnetes oder eines Stahlmagnetes hindurchbewegte; sodann am Ende der Pendelstange mit den Windungen in der Horizontalebene, so dass sie bei den Oscillationen über das eine Ende einer horizontal gelegten ringförmigen, von verschieden starken Strömen durchflossenen inducirenden Spirale hinüber geführt wurde. In den inducirenden Stromkreis war der eine Contact des Interruptors eingefügt; ein anderer Contact vermittelte die Verbindung des einen Endes der Inductionsspirale mit der einen Platte eines Condensators, dessen andere Platte, ebenso wie das andere Ende der Inductionsspirale, zur Erde abgeleitet war. Alle Verbindungen waren sorgfältig isolirt. Je nach der ersten Elongation, von der aus das Pendel seine Schwingung begann, ging die Inductionsspirale mit verschiedener Schnelligkeit bei dem inducirenden Kreise vorbei. Die Unterbrechungen geschahen beide kurz nacheinander.

Die Ladung des Condensators wurde an einer Coulomb'schen Drehwage mit Spiegelablesung gemessen.

Bei einer Reihe von Vorversuchen war ein Punkt der Schliessung eines Bunsen'schen Elementes zur Erde abgeleitet, ein anderer unter Einschaltung einer Spirale mittelst zweier Contacte des Interruptors mit dem Condensator in der Weise verbunden, dass die Oeffnung des ersten Contacts diese Verbindung schloss, die des zweiten sie früher oder später unterbrach. Dadurch wurde erwiesen, dass die Zeit der Verbindung der Inductionsspirale mit dem Condensator genügte, um den letzteren zu einer der jeweilig wirkenden elektromotorischen Kraft proportionalen Höhe zu laden. Die Versuche bestätigten vollständig die obigen Sätze.

268 Fr. Fuchs[2]) hat die Spannung an den Enden der Inductionsspirale eines du Bois'schen Schlittenapparates mittelst des Hankel'schen Elektrometers bestimmt. Es wurden drei Apparate mit 9400,

[1]) L. Donati, Sulla misura elektrostatica della forze elettromotrici d'induzione, Pisa 1875. Habilitationsschrift, Nuovo Cimento [2] 13, p. 65, 97, 1875*. — [2]) Fuchs, K. Sächs. Berichte, 1874, p. 56*.

10243 und 4315 Windungen der Inductionsrolle verwendet. Bei der ersten Versuchsmethode waren beide Platten des Elektrometers isolirt mit den Polen der die Ladung liefernden, in der Mitte abgeleiteten Säule von 100 Plattenpaaren verbunden; die Inductionsspirale wurde an einem Ende abgeleitet und ihr freies Ende durch einen aus Schellack und Kupferdrähten zusammengesetzten Commutator in abwechselnder Richtung mit dem Goldblatt des Elektrometers verbunden. Der in abwechselnder Richtung angewendete inducirende Strom wurde einmal geöffnet oder geschlossen und die Summe A der Ausschläge des Goldblatts bei beiden Commutatorstellungen beobachtet. Dieselben waren nur vorübergehend, da der Ladung des Goldblatts sogleich die Entladung folgte. Das Goldblatt muss so eingestellt werden, dass es von beiden Platten des Elektrometers gleich stark beeinflusst wird.

1) Bei Oeffnung und Schliessung der inducirenden Rolle hatte A in allen vier Fällen den gleichen Werth.

2) Bei Anwendung von 1 bis 5 Grove'schen Elementen zur Erregung des inducirenden Stromes wurde das eine Ende der inducirenden Spirale mit der Erde, das andere mit dem Goldblatt verbunden und bei abwechselnder Richtung der Ausschlag B desselben gemessen. Derselbe misst den Potentialunterschied an den Enden der inducirenden Spirale. Die Ausschläge A durch die Inductionsströme waren den Ausschlägen B proportional.

Dasselbe ergab sich, wenn die Inductionsspiralen zweier Inductoren hinter einander verbunden, am einen Ende abgeleitet und am anderen mit dem Goldblatt verbunden wurden. Beim Schliessen und Oeffnen eines in gleicher oder entgegengesetzter Richtung durch die inducirenden Rollen geleiteten Stromes entsprach der Ausschlag A des Goldblatts der Summe oder Differenz der durch jede Spirale für sich unter gleichen Bedingungen erzeugten Ausschläge.

3) Bei Anwendung von 20 bis 100 Elementen zur Ladung der Platten des Goldblattelektroskops waren die Ausschläge der Zahl der Elemente in allen Fällen der Oeffnung und Schliessung proportional, wenn die Platten dem Goldblatt nicht zu nahe standen.

Nach den Versuchsreihen 2 und 3 ist also der Ausschlag des Goldblatts bei gleicher Beschaffenheit des Elektroskops dem Product der Ladung des Goldblatts und der Platten proportional und entspricht, unabhängig von dem beim Oeffnen und Schliessen verschiedenen zeitlichen Verlauf der Induction, der gesammten, im Verlauf der Induction inducirten elektromotorischen Kraft E.

Ist dieselbe in jedem einzelnen Moment gleich e, sind k und k_1 Constante, ist z die Zahl der mit den Platten verbundenen Elemente, i die Intensität des inducirenden Stromes, so ist also der Ausschlag

$$A = kz\int_0^\infty e\,dt = k.z.E = k_1 z i.$$

269 Die Angaben des Elektrometers ändern sich, wenn man allmählich den Widerstand des die Verbindung desselben mit der Inductionsspirale vermittelnden Körpers vermehrt, wie Fuchs l. c. gezeigt hat.

Wurde zwischen das Ende der Inductionsrolle und das Elektrometer eine 80 cm lange Säule von käuflichem absolutem Alkohol eingefügt, so blieben die Ausschläge A noch ungeändert. Da die Capacität der Oberfläche des Alkohols gering ist, so ist dies ein Beweis, dass die in der Inductionsrolle geschiedenen und ihren Enden zugetriebenen Elektricitäten in einer Zeit t durch die Alkoholsäule hindurch zum Elektrometer gelangen, welche gegen die Zeit t_1 der Induction selbst sehr klein ist, also während jener Zeit t die geschiedenen Elektricitäten sich noch nicht rückwärts durch die Inductionsrolle ausgleichen.

Wird dagegen eine lange, mit reinem Olivenöl gefüllte Glasröhre in die Leitung eingefügt, so nehmen die Ausschläge sehr bedeutend ab; die Leitung in der Oelschicht nimmt also viel längere Zeit in Anspruch. Wird aber nur eine sehr dünne Oelschicht eingeschaltet, so nehmen die Ausschläge des Elektrometers bedeutend zu, namentlich bei dem Oeffnungsstrom auf mehr als das Doppelte. Der Grund dürfte sein, dass hier die Oelschicht bei einer höheren Spannung der Elektricität durchbrochen und so der Eintritt derselben in das Elektrometer ermöglicht wird. Nimmt bei Ausbreitung derselben auf dem Goldblatt die Spannung ab, so kann die Elektricität nicht durch die Oelschicht zurückfliessen, der Ausschlag des Goldblatts ist grösser und nimmt nur langsam bis Null ab.

Bei Einfügung einer dünnen Schellackschicht bleibt hierbei sogar eine dauernde Ladung des Goldblattes zurück.

270 Stellt man das Goldblatt einer der Platten des Elektroskops näher und leitet (I) beide Platten ab, so zieht bei Ladung des Goldblattes durch die Inductionsrolle die in der näheren Platte vertheilte Elektricität dasselbe stärker an. Wenn, wie oben, die in jedem Moment dem Goldblatt zugeführte Elektricität gleich e ist, so ist der Ausschlag desselben jetzt $B_a = const \int_0^\infty e^2 dt$. Dasselbe ist für die Ausschläge B_b der Fall, wenn man (II) die eine Platte ableitet und sowohl das Goldblatt, wie auch die andere Platte mit dem Ende der Inductionsrolle verbindet.

In diesem Fall ist der Ausschlag des Elektrometers auch bei kurzer Schliessung nicht mehr von dem zeitlichen Verlauf der Induction unabhängig, da der Werth B bei gleich bleibender Gesammtmenge $\int_0^\infty e dt$ um so grösser wird, je schneller die Werthe e mit der Zeit abfallen. Dabei sind die Schliessungsausschläge viel kleiner, als die Oeffnungsausschläge, da die Induction bei der Schliessung viel langsamer verläuft.

271 Ferner wurden zwei inducirende Spiralen I und II, wie beim Differentialinductor von Dove, in denselben Stromkreis eingeschaltet,

und wurde die zu der ersten gehörige Inductionsrolle einerseits mit der Erde, andererseits mit dem Elektrometer verbunden, wobei die Entfernung der Spiralen I und II von einander so gross war, dass II auf die Inductionsrolle von I nicht merklich inducirend wirkt. Die Rolle II blieb entweder a) leer, oder es wurde b) in sie ein Eisenkern eingelegt oder c) ausserdem die ihr zugehörige Inductionsrolle in sich geschlossen. Die Ausschläge A, welchen die Gesammtinduction entspricht, blieben in allen Fällen gleich, die Ausschläge B waren beim Einlegen des Eisenkerns sowohl für die Oeffnungs- wie die Schliessungsinduction vermindert, mochte das positive oder negative Ende der Inductionsrolle mit dem Elektrometer verbunden sein. Bei hinzukommender Schliessung der Inductionsrolle II waren die Ausschläge für die Oeffnungsinduction wenig, wohl aber für die Schliessungsinduction stark verkleinert.

Wurden zwei Spiralen mit Eisenkernen in den Stromkreis eingefügt und die Ausschläge A und B für die Inductionsspiralen auf beiden untersucht, und war A für beide Spiralen nahe gleich, so war B kleiner für die mit mehr Windungen versehene Spirale; der Verlauf des Stromes ist also langsamer.

Wurden zwei secundäre Spiralen hinter einander verbunden, so war der Ausschlag A gleich der Summe der Ausschläge A_{I} und A_{II} für beide Spiralen einzeln; der Ausschlag B war aber bei den verbundenen Spiralen viel grösser, als die Summe der Einzelausschläge B_{I} und B_{II}, da es dem Quadrat der zugeführten Elektricitäten proportional ist.

272 Wurde zwischen die Inductionsspirale und das Goldblatt ein sehr schlechter Leiter, eine Alkoholsäule von 6 bis 80 cm eingeschaltet, so nahmen die Ausschläge B_a erheblich ab. Befand sich dieselbe in der Verbindung des abgeleiteten Endes der Inductionsspirale mit der Erde, so ergab sich dasselbe. Die Ausschläge B_b nehmen ebenso ab, wenn die Alkoholsäule in die zur Platte des Elektrometers führende Leitung eingefügt wird. Wird sie in die Zweigleitung zum Goldblatt eingefügt, so nehmen sie meist ebenfalls ab und kehren sich dann bei noch gesteigertem Widerstand um; wohl in Folge der grösseren Vertheilungswirkung in letzterem Falle.

Wird eine grössere leitende Fläche zwischen das Ende der Inductionsspirale und das Goldblatt eingeschaltet, z. B. mit der Zuleitung zu letzterem die innere Belegung einer Leydener Batterie verbunden, deren äussere Belegung abgeleitet ist, so bleiben sowohl die Ausschläge A wie B ungeändert.

273 Zur Nachweisung der durch die Extraströme verursachten freien Spannung theilt Fuchs [1]) den Strom einer wohl isolirten Säule S

---

[1]) Fr. Fuchs, Pogg. Ann. 155, p. 69, 1875*.

(Fig. 68) nach Art der Wheatstone'schen Drahtcombination in zwei Parallelzweige, von denen der eine abc aus einer 11 cm langen, $3^1/_2$ mm weiten, mit Kupfervitriollösung gefüllten und mit Kupferelektroden versehenen Glasröhre besteht. In der zweiten adc ist eine mit Eisenkernen versehene Spirale σ und ein Kupfervitriolrheostat R eingefügt. Punkt b ist durch einen in die Kupferlösung eingesenkten Kupferdraht mit der Erde, d mit dem Goldblatt G des Elektrometers verbunden. Zuerst wird der Rheostat R so regulirt, dass bei dauernder Oeffnung oder Schliessung des Hauptstromes bei f oder g das Goldblatt auf Null stehen bleibt. Wird dann der Strom plötzlich geöffnet oder geschlossen, so zeigen sich die den Extraströmen in der Spirale entsprechenden Ausschläge. Ist die elektromotorische Kraft des Extrastromes in jedem Moment gleich e, ist das Verhältniss der Widerstände von $ab:bc$ oder $ad:dc = 1:n$, so ist die Spannung bei der Oeffnung und auch der Schliessung in d in jedem Moment gleich $const\ en/(n+1)$, also der Ausschlag des Goldblatts

Fig. 68.

$$A = const\,\frac{n}{n+1}\int_0^t e\,dt.$$

Bei den Versuchen waren die Widerstände von ab und bc einander gleich, also $n/(n+1) = {}^1/_2$. Wie zu erwarten, waren die Oeffnungs- und Schliessungsausschläge A einander völlig gleich. — Bringt man in den Zweig bc eine der Spirale σ ganz gleiche Spirale, in welcher die elektromotorische Kraft der Induction der der ersten Spirale entgegengerichtet ist, und sind wie vorher die Widerstände $ad = dc$ und $ab = bc$, so werden die Ausschläge doppelt so gross, wie bei dem vorherigen Verfahren.

Auch den zeitlichen Verlauf der Extraströme kann man bestimmen, wenn man bei der Einschaltung der beiden Spiralen in die Zweige ad und bc die eine Platte des Elektrometers zur Erde ableitet, die andere, sowie das Goldblatt mit dem Punkte d verbindet. Dann ist wieder der Ausschlag $B = const \int_0^t e^2 dt$. Die Schliessungsausschläge sind indess hierbei verschwindend. Wurden mehr und mehr Eisendrähte in die Rollen eingelegt, so nahm der Ausschlag B erst ab, dann wieder zu. Er nahm ebenso ab bei Umwickelung der Spirale mit Stanniol.

Wurde die Spirale in *bc* fortgelassen, so ergaben sich auch bei der Oeffnung keine Ausschläge des Goldblatts, indem nun die inducirten Ströme in σ im Kreise *adcba* ungehindert verliefen.

274 Hat man in einer geöffneten Inductionsspirale, sei es durch Batterieentladungen, sei es auf galvanischem Wege, einen Inductionsstrom erzeugt, durch welchen sich ihre Enden mit freien Elektricitäten laden, so fliessen dieselben nach Aufhören der inducirenden Wirkung wiederum rückwärts in der Spirale zusammen. Hierdurch entsteht ein dem Inductionsstrom entgegengerichteter Strom. Durch das Entstehen desselben wird wiederum in der Spirale ein ihm entgegengerichteter Strom inducirt, der von Neuem die Enden der Inductionsspirale im ersten Sinne laden kann u. s. f. So entstehen in der Spirale abwechselnd gerichtete, oscillirende Entladungen. Viel stärker treten dieselben hervor, wenn man die Enden der Spirale mit Körpern von grosser Capacität, z. B. den Belegungen eines Condensators verbindet und dadurch grössere Elektricitätsmengen daselbst ansammelt. Auch die über einander liegenden, mit verschiedener Spannung geladenen Enden der Inductionsrolle selbst können hierbei als Sammelstellen dienen.

275 Oscillatorische Entladungen in Inductionsspiralen, deren Enden mit Conductoren verbunden sind, hat Helmholtz [1]) beobachtet, und zwar in einem ununterbrochenen Schliessungskreise, bei welchem die durch etwaiges Auftreten von Funken an einer Unterbrechungsstelle verursachten Störungen fortfielen.

Ein schweres eisernes Pendel, dessen Lager an der Mauer befestigt war, trug unten zwei mit Achatplatten belegte Hervorragungen, welche beim Durchgang des Pendels durch die Gleichgewichtslage gegen die stählernen Enden zweier leichter Hebelchen gegenschlugen, durch deren Bewegung einmal die Stromesleitung der inducirenden Spirale eines du Bois'schen Schlittenapparates geöffnet, sodann ein zweiter Kreis geöffnet wurde, welcher die inducirte Spirale desselben Apparates enthielt. Das eine Hebelchen war auf einer Unterlage befestigt, das andere konnte durch eine Mikrometerschraube verschoben werden, aus deren Stellung, unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Pendels, die Zeit zwischen dem Oeffnen beider Stromkreise bis auf $^1/_{231170}$ Secunde bestimmt werden konnte.

Die Enden der inducirten Spirale waren mit den Belegungen einer Leydener Batterie verbunden, welche sich bei dem Oeffnen des inducirenden Kreises durch den, dem Strom in demselben gleichgerichteten Inductionsstrom lud und sodann in Oscillationen rückwärts entlud.

---

[1]) Helmholtz, Verhandl. des naturhist. medic. Vereins zu Heidelberg 1869, 30. April, p. 353*. Beschreibung des Apparates auch Monatsber. der Berl. Akad. 1871, 25. Mai, p. 295*.

Während derselben wurde durch obigen Apparat die inducirte metallische Leitung unterbrochen. Zugleich blieb aber eine Nebenleitung zu derselben geschlossen, welche den Nerven eines stromprüfenden Froschschenkels enthielt, der völlig in $^1/_2$ procentige Kochsalzlösung eingelegt war. In die Lösung tauchte als Elektrode ein Platinblech. Das Ende des Nerven war in ein ebenfalls mit der Lösung gefülltes Glasröhrchen gezogen, in welche ein Platindraht tauchte.

Erst wenn die Unterbrechung des metallischen Kreises der inducirten Leitung erfolgte, floss ein merklicher Theil des Stromes durch den Nerven. Man kann an der Stärke der Zuckung erkennen, zu welchen Zeiten die Elektricität der Spirale am stärksten dem Nerven zuströmt, wann also die Intensität des Stromes in der Spirale ein Maximum ist, umgekehrt also, wann die Belegungen der Batterie am schwächsten geladen sind. Die Stärke der Zuckung bestimmt zugleich die Richtung des Stromes, je nachdem er im Nerven auf- oder absteigt. Tritt dagegen die Verbindung mit dem Nerven zu einer Zeit ein, wo die Stromesrichtung in der Spirale wechselt, die Batteriebelegungen also besonders stark geladen sind, so fliesst der nur allmählich ansteigende Strom durch einen Kreis von so grossem Widerstand durch den Nerven, dass er ihn viel schwächer erregt. Die Zeit zwischen der Oeffnung beider Kreise wurde durch Verstellen des einen Hebelchens mittelst der Mikrometerschraube regulirt, und dann die inducirte von der inducirenden Spirale so weit entfernt, dass gerade eine Zuckung zu beobachten war; diese Entfernung war grösser oder kleiner, je nachdem der Strom in der Inductionsspirale im Maximum seiner Intensität war oder nicht.

Bei Anwendung eines Grove'schen Elementes konnte man im Ganzen etwa während $^1/_{50}$ Secunde Oscillationen der Entladung wahrnehmen, und zwar betrug das Intervall zwischen zwei Oscillationen, die bis zur 45ten wirklich beobachtet werden konnten, mit einer gewöhnlichen Leydener Flasche $^1/_{2164}$ Secunde. Bei Vereinigung mehrerer Flaschen fiel die Zahl der Oscillationen etwas grösser aus, als aus der Capacität der Flaschen folgen würde, da die Enden der Spirale selbst sich laden und die Influenz der inneren Windungen durch die Seide hindurch diese Elektricitätsanhäufung steigert.

276 Auch in einer einerseits ganz isolirten, andererseits mit der Erde verbundenen Spirale, bei der die Nebenleitung mit dem Nerven in die Verbindung mit der Erde eingeschaltet war, beobachtete Helmholtz (l. c.) sehr schnelle Oscillationen (etwa 7300 in der Secunde), welche schnell an Intensität abnahmen.

Ist die Spirale durch einen sehr schlecht leitenden Körper, z. B. einen Nerven, geschlossen, so können ähnliche Schwankungen eintreten.

277 Ein ähnliches Resultat ergiebt sich an einer geöffneten Inductionsspirale, deren beide Enden frei sind, auch wenn sie nicht mit Conden-

satoren verbunden sind. Hierbei dienen die Enden der Spirale selbst als Condensatoren (s. §. 274).

Derartige Versuche sind von Bernstein[1]) vermittelst des Thl. II, §. 811 beschriebenen Apparates angestellt worden.

Zwischen die Quecksilbernäpfe q_1 und q_2 dieses Apparates (Fig. 69) wurde eine Kette und die inducirende Spirale eines du Bois'schen

Fig. 69.

Schlittenapparates eingefügt, in den Schliessungskreis von *d* und *p* die Inductionsspirale (von 6894 Windungen) und ein Galvanometer. Bei der Rotation der Axe wurde der Ausschlag desselben bemerkt, während allmählich der Schieber *y* mit Napf *d* so gedreht wurde, dass die Schliessung der Inductionsrolle eine bestimmte Zeit nach der Oeffnung der inducirenden Rolle momentan durch Spitze *p* erfolgte. Dabei ergaben sich abwechselnd positive und negative Ausschläge, die immer mehr abnahmen. Stets dauerte die erste Oscillation länger als die folgenden, wohl weil die Oeffnung des inducirenden Stromkreises nicht plötzlich erfolgte. Die späteren Oscillationen waren ganz regelmässig. Ihre Dauer betrug bei Anwendung eines Grove'schen Elementes 0,0005, bei der eines Daniell'schen Elementes 0,0001 Secunde. Im Ganzen konnten bei Anwendung zweier Grove'scher Elemente die Oscillationen während einer Zeit von etwa 0,0014, bei einem

[1]) Bernstein, Pogg. Ann. **142**, p. 54, 1871*.

Daniell'schen Element während etwa 0,0007 Secunden beobachtet werden. Wurde die Inductionsspirale durch einen du Bois'schen Rheochord dauernd geschlossen und wurden die Verbindungsstellen der Spirale mit dem Rheochord mit dem Napf d und der Spitze p des Rotationsapparates unter Einschaltung des Galvanometers in diese Zweigleitung verbunden, so ergaben die Ausschläge des letzteren nur die aus der geschlossenen Inductionsleitung abgeleiteten Ströme. Dieselben waren zu allen Zeiten positiv, d. h. dem inducirenden Strom gleichgerichtet, indess schwankte ihre allmählich abnehmende Intensität auf und nieder. Hiernach glich sich also ein grosser Theil des inducirten Stromes regelmässig durch die Leitungen aus, und nur ein kleiner Theil der bewegten Elektricitäten staute sich durch Bindung an den Unterbrechungsstellen des Inductionskreises an, um dann durch Rückentladung abwechselnd immer schwächer werdende, positive und negative Oscillationen zu erzeugen, die sich zu dem mit abnehmender Stärke in einseitiger Richtung das Galvanometer durchfliessenden Theile des Inductionsstromes addirten. Die Ausschläge konnten hier noch bis nach 0,002 Secunden nach dem Oeffnen beobachtet werden.

Wurden die Enden der inducirten Spirale mit zwei in Kupfervitriollösung tauchenden Kupferplatten verbunden, so dass beim Oeffnen ihres Kreises durch den Rotationsapparat noch eine Nebenschliessung übrig blieb, so konnten keine Oscillationen des Oeffnungsstromes beobachtet werden. Die Induction findet hier langsamer statt, der Inductionsstrom steigt schnell an und fällt sehr langsam ab, so dass noch nach 0,0046 Secunden die Ausschläge zu beobachten sind.

Ganz ähnliche Oscillationen, wie in einer Inductionsspirale, treten auch in der primären Spirale selbst nach dem Oeffnen des Stromes auf. Zum Nachweis derselben verband Bernstein die Enden derselben einmal unter Einschaltung einer Kette mit den beiden Quecksilbernäpfen q_1 und q_2, sodann durch eine zweite Leitung, welche ein Galvanometer enthielt, mit dem Napf d und der Spitze p, so dass eine bestimmte Zeit nach der Oeffnung des Stromes beim Abgleiten der Spitzen p_1 und p_2 von dem Quecksilber in q_1 und q_2 die Enden der Spirale mit dem Galvanometer verbunden wurden.

Der Oeffnungsstrom tritt hierbei im Moment der Oeffnung der Spirale selbst auf und zeigt bei kurzer Spirale (der inducirenden Spirale des du Bois'schen Apparates) nur einige unbedeutende positive und negative Schwankungen. Bei Anwendung einer längeren Spirale, z. B. der Inductionsspirale des Apparates, treten die Oscillationen ebenso deutlich, wie bei den zuerst beschriebenen Versuchen und mit denselben Eigenthümlichkeiten hervor. Da sich der Strom durch d und p ausgleicht, entsteht bei q kein Oeffnungsfunken, welcher aber sogleich erscheint, sowie die Verbindung mit d und p unterbrochen wird.

Wird, wie bei den ersten Versuchen, eine Nebenschliessung zu der Spirale in dem d und p enthaltenden Zweige vor dem Galvanometer

eingefügt, so zeigen sich weder abwechselnd gerichtete, noch in ihrer Intensität auf und nieder schwankende Ströme.

Der Extrastrom erreicht dann nach $^1/_{10000}$ Secunde sein Maximum, fällt erst schnell, dann langsam ab und ist bis 0,002 Secunden nach der Oeffnung zu verfolgen.

278 Wurde bei den Versuchen von Bernstein[1]) statt der Spirale (ohne Nebenschliessung) ein gerader, 12 m langer, 0,5 mm dicker Kupferdraht eingeschaltet und ein Strom von 4 Grove'schen Elementen angewendet, so erschien in ihm im Moment der Oeffnung ein sehr kurz andauernder Strom, welcher ihn in derselben Richtung durchfloss, wie der primäre Strom. Die Dauer des so inducirten Extrastromes betrug nur 0,00008 Secunden.

Bei Anwendung eines 18 cm langen, 5 cm breiten und 3 cm hohen, 2 cm hoch mit concentrirter Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd gefüllten Glastroges, in welchen zwei amalgamirte Zinkplatten von 1,5 cm Länge und 2,5 cm Breite in einem Abstand von 14,5 cm eintauchten, an Stelle des Kupferdrahtes, also bei Einfügung eines schlechteren Leiters, konnten vermittelst einer Säule von 12 kleinen Grove'schen Elementen sehr deutlich 6 bis 8 abwechselnd gerichtete Oscillationen beobachtet werden, deren Dauer etwa 0,000095 Secunden betrug. Die Oscillationen treten also auch in Elektrolyten auf.

Um den Schwierigkeiten zu entgehen, welche durch eine etwaige Ladung des Drahtes der Bussole entstehen könnten, dessen eines Ende dauernd mit der Kette verbunden war, wurde an der Stelle, wo dasselbe sich, ebenso wie der gerade Draht, an die Leitung zum einen Pol der Säule anfügte, eine Leitung zur Erde hergestellt.

Aehnliche Oscillationen lassen sich auch bei Füllung des Glastroges mit verdünnter Schwefelsäure zwischen Platinelektroden beobachten.

279 Auch Mouton[2]) hat die oscillatorische Entladung in Inductionsspiralen studirt, und zwar direct, indem er die an ihren Enden auftretenden freien Elektricitäten den Quadranten eines Quadrantelektrometers nach Branly-Mascart durch einen Commutator zuführte.

Der hierzu dienende Apparat besteht aus drei auf eine Axe aufgesetzten Rädern. Das erste, welches zur Schliessung und Unterbrechung des inducirenden Stromes dient, ist auf seiner Peripherie so ausgefeilt, dass dieselbe sich von einer Stelle an allmählich, etwa über einen Viertelkreis, erweitert und sich dann plötzlich verjüngt, so dass daselbst eine zahnförmige Einbuchtung entsteht. Die Peripherie dieses Rades schleift gegen eine mit dem einen Ende der vertical gestellten inducirenden

---

[1]) Bernstein, Monatsber. d. Berl. Akad. 1871, 13. Juli, p. 380*. — [2]) Mouton, Compt. rend. **82**, p. 84, 1387*; **83**, p. 142, 1876*; Journ. de Physique **6**, p. 5, 46, 1876*.

Spirale verbundene Schneide von Bronce, welche durch eine Feder nach vorn gedrückt und durch eine Schraube zurückgezogen wird. Diese Schneide kann durch eine auf $^1/_{50}$ Millimeter graduirte Mikrometerschraube gehoben und gesenkt werden.

Die beiden anderen kreisförmigen Räder tragen auf ihrer Peripherie eine ihnen concentrische, etwa $^1/_6$ bis $^1/_4$ Kreis umfassende, durch einzelne hindurchgehende Schrauben an weiteren Schwingungen gehinderte Feder, auf deren Ende wiederum Schneiden befestigt sind, die je bei einer Umdrehung der Räder genau zu gleicher Zeit an zwei isolirte Spitzen anschlagen. Diese letzteren sind mit den Quadranten des Elektrometers verbunden. Die beiden Räder sind durch eine schleifende Metallfeder beständig mit den Enden der inducirten Spirale verbunden. Je nach der Stellung der die Schliessung und Oeffnung des inducirenden Stromes bewirkenden Spitze wird somit der inducirte Kreis eine bestimmte Zeit nach Beginn der Induction mit dem Elektrometer in Verbindung gesetzt.

Zur Bewegung der die Räder tragenden Axe diente eine kleine Gramme'sche Maschine. Die Regelmässigkeit der Drehungen wurde vermittelst eines nach dem Watt'schen System construirten Centrifugalregulators hergestellt, durch welchen spiralig auf Hartkautschukcylinder aufgewundene Eisendrähte mehr oder weniger tief in Quecksilber eingesenkt wurden. Die Drähte und das Quecksilber waren in den Kreis des die Maschine treibenden Stromes eingefügt. Um die Geschwindigkeit der Drehung der Räder zu messen, war auf ihre Axe ein Zahn aufgesetzt, der bei jeder Umdrehung eine Feder gegen einen Anschlag drückte und dadurch den Stromkreis eines gewöhnlichen Schreibelektromagneten schloss. Derselbe verzeichnete gleichzeitig mit einer Stimmgabel seine Zeichen auf geschwärztem Papier.

Bei schnell auf einander folgender Wiederholung der Verbindungen ladet sich das Elektrometer bald auf das Potential an den Enden der Inductionsrolle.

Die vier angewandten inducirenden Rollen hatten keine Eisenkerne; sie bestanden aus 1 bis 4 Lagen von übersponnenem Kupferdraht von 1 mm Dicke. Der sie durchfliessende Strom wurde durch ein Daniell'sches Element (mit Kupfervitriol- und Zinkvitriollösung) erzeugt. Die zwei Inductionsrollen, welche genau über diese Spiralen passten, hatten 1) 7,5 cm äusseren Durchmesser, 15 cm Länge, 13860 Windungen von Draht von 0,25 mm Dicke, 2500 m Drahtlänge, 942 Ohm Widerstand; 2) gleiche Dimensionen, aber 7260 Windungen von 0,4 m dickem Draht, 1200 m Drahtlänge und 164 Ohm Widerstand. Die Versuche ergaben Resultate, welche im Wesentlichen mit den früher auf anderen Wegen erhaltenen übereinstimmen. Schon unter 4 Milliontel Secunden nach dem Oeffnen des inducirten Stromes zeigt sich eine Spannung. Es wurde eine grosse Anzahl alternirender Ströme beobachtet, wobei die alternirenden Maximalladungen allmählich an Stärke abnahmen. Die Zeit

zwischen den Momenten, zwischen denen keine Ladung auftritt, ist stets die gleiche, mit Ausnahme der ersten Oscillation, welche länger ist. Diese Zeitdauer ist unabhängig von der Zahl der Windungen der inducirenden Spirale und der Intensität des inducirenden Stromes.

In tausendstel Secunden ausgedrückt ist bei der Spirale von

	13860	7260 Windungen
die Dauer der ersten Periode	0,108 bis 0,112	0,035
„ „ „ folgenden Perioden	0,076 „ 0,077	0,023 bis 0,025

Eisendrähte in der Spirale verlängern nur die erste Periode, nicht die folgenden. Bei Einlegen von 10, 20, 40 je 1 mm dicken Eisendrähten wird bei der grösseren Inductionsspirale die Zeit der ersten Periode resp. 0,144; 0,153; 0,171, wobei das erste Maximum bedeutend (z. B. von 18 bis 50) steigt.

Die Dauer der isochronen Perioden verhalten sich in beiden Spiralen wie die Quotienten ihrer Drahtlängen durch ihren Querschnitt:

$$\left(\frac{2500}{0,25} : \frac{1200}{0,4} = 3,0;\quad \frac{0,077}{0,024} = 3,2\right).$$

Bei Vermehrung der Intensität i des inducirenden Stromes wächst der Werth des ersten Maximums m unter sonst gleichen Bedingungen schneller, als diese Intensität; dagegen ist der Gesammtwerth s der während der ersten Periode inducirten elektromotorischen Kräfte derselben direct proportional ($i = 1, 2, 3$; $m = 18, 40, 63$; $s = 140, 281, 428$).

Ebenso wächst bei gleicher Stromintensität das erste Maximum (m) schneller als die Zahl n der Windungsreihen der inducirenden Spiralen, während wiederum die gesammte inducirte elektromotorische Kraft s während der ersten Periode derselben proportional ist

$$(n = 1, 2, 3, 4;\quad m = 28, 61, 104, 150;\quad s = 90, 182, 300, 393).$$

Die Maxima der auf einander folgenden Oscillationen nehmen bei den verwendeten Inductionsspiralen ziemlich langsam ab. Sie waren z. B. + 61,7, — 46, + 41,4, — 36,8, + 34,4, — 31,6 u. s. f. — Die Einführung von Eisenkernen vergrössert die Maxima und die Summen s.

280 Cazin[1]) hat mittelst eines Fallapparates analoge Versuche angestellt. Er lässt zwischen zwei Leisten ein Gewicht fallen, an welchem zwei Metallplatten befestigt sind. Die eine ist unten mit einer Metallspitze versehen, welche beim Hinabfallen in Quecksilber taucht, und trägt oberhalb einen Draht, der ebenso, wie das Quecksilber mit den Elektroden eines die primäre Spirale und die Säule enthaltenden Schliessungskreises verbunden ist. Die zweite Metallplatte trägt eine Stahlfeder, welche durch einen biegsamen Draht unter Zwischenschaltung eines Galvanometers mit

---

[1]) Cazin, Ann. de Chim. et de Phys. Ser. 5, 1, p. 449, 1874*; Compt. rend. 77, p. 117, 1873*. Siehe auch Versuche von Bazzi u. Corbianchi, l. c., §. 129.

sehr langem Drahtgewinde mit einem Punkt des Schliessungskreises verbunden ist. Ein anderer Punkt desselben ist mit einer Metallplatte in Verbindung, die beim Fallen des Gewichtes von der Feder während einer Zeit von 0,0004 bis 0,0005 Secunde berührt wird. Zwischen beiden Ableitungspunkten kann die Inductionsspirale eingeschaltet werden. Je nach der Höhe der Quecksilbersäule ist die Zeit zwischen der Schliessung dieser Zweigleitung und der Hauptleitung verschieden lang, und so kann der Gang der Induction beobachtet werden.

Hierbei fand Cazin im Wesentlichen die schon bekannten Resultate. Befand sich zwischen den Ableitungspunkten ein gerader Draht, so stieg mit der Zeit der Einschaltung der Ausschlag des Galvanometers bis zu einem Maximum M. Der Gang der Ausschläge ist dabei unabhängig von den Orten der Ableitung. Befand sich eine Spirale zwischen den Ableitungsstellen, so stieg die Intensität erst schnell auf und sank dann wieder bis auf M. Auch hier war der Ort des Schliessungspunktes des Kreises und der Ort der Ableitung ohne Einfluss; auch ist die Dauer der variablen Periode unabhängig von der Art der Ableitung. Bei verschiedenem Abstand der Ableitungspunkte ist die Stromintensität in der Zweigleitung in jedem entsprechenden Moment dem Widerstand des zwischen den Ableitungspunkten liegenden Theils der Hauptleitung proportional. Ein Eisenkern in der Inductionsspirale verlängert bedeutend die Zeit des variablen Zustandes. Es ist also zunächst eine Oscillation nachgewiesen, die folgenden wurden nicht beobachtet.

281 Ist die Inductionsspirale in einzelnen, der Axe parallelen Lagen über die inducirende Spirale gewunden, so ist das innere Ende der ersteren der letzteren, event. dem in derselben befindlichen Eisenkern näher, als das äussere. Je nachdem also das eine oder andere Ende zur Erde abgeleitet wird, ist die Bindung der am freien Ende der inducirten Spirale bei der Induction angehäuften Elektricität kleiner oder grösser (vergl. §. 264). Es ergeben sich daher bei Messung der oscillatorischen Rückentladung der Inductionsspirale verschiedene Resultate. Diese Unterschiede fallen fort, wenn, wie bei den später construirten Inductorien (vergl. das Cap. elektromagnetische Inductionsapparate), die Windungen in einzelnen zu der Axe der Inductionsspirale normalen, parallelen Schichten bis zur vollen Dicke der Spirale neben einander gewunden werden.

Besteht die Inductionsspirale aus zwei Spiralen, deren innere Enden mit einander verbunden sind, so sind bei der Induction ihre freien äusseren Enden gleich stark entgegengesetzt geladen [1]).

282 Die Berechnung der Bildung von Oscillationen in geöffneten Inductionsspiralen, deren Enden event. mit Conductoren oder Condensatoren verbunden sind, geschieht ganz ähnlich wie bei der Entladung eines Condensators.

[1]) Mouton, l. c. §. 279.

Ist das Potential der inducirenden Spirale auf die inducirte P_{12}, die Stromintensität in ersterer I_1 und nehmen wir an, dass bei der Inductionswirkung die Ladung der Enden der Inductionsspirale ganz plötzlich entstände, so ist die Potentialdifferenz daselbst gleich $P_{12} I$ (wobei die Inductionsconstante gleich Eins gesetzt ist). Ist die Capacität der geladenen Enden der Spirale c und des damit verbundenen Condensators c_1, also beider zusammen $c + c_1 = C$, so ist die bei der Ladung angehäufte Elektricitätsmenge gleich $I_1 P_{12} C$.

Für den Fall der oscillirenden Entladungen in der inducirten Spirale, wo nach §. 194 $r^2/4P^2 < 1/CP$ ist, wird also, wenn die Zwischenzeit zwischen zwei Maximis der Stromintensitäten $\pi/a' = T$ ist, nach Gleichung 5) §. 194

$$i = I \frac{P_{12}}{P} \frac{T}{\pi} e^{-\frac{r}{2P} t} \sin \frac{\pi}{T} t \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

Dieselbe Zwischenzeit T ist auch gleich der Zwischenzeit zwischen den Zeiten der positiven oder negativen Maximis der Ladung der Enden der Inductionsrolle, für welche Zeiten $i = 0$ ist.

Bedient man sich also zweier Inductionsspiralen, deren Potential auf sich selbst P' und P'', deren Capacitäten c' und c'' sind, und beobachtet die Schwingungsdauern T' und T'', einmal ohne ihre Verbindung mit einem Condensator von der Capacität c', sodann die Schwingungsdauern T'_1 und T''_1 mit dem Condensator, so folgt, wenn der Widerstand r klein ist, wie in §. 194

$$T' = \pi\sqrt{c' P'}; \qquad T'' = \pi\sqrt{c'' P''};$$
$$T'_1 = \pi\sqrt{(c' + c_1) P'}; \quad T''_1 = \pi\sqrt{(c'' + c_1) P''},$$

woraus sich ergiebt

$$\frac{P'}{P''} = \frac{T_1'^2 - T'^2}{T_1''^2 - T''^2}; \qquad \frac{c''}{c'} = \frac{T''^2}{T'^2} \cdot \frac{T_1'^2 - T'^2}{T_1''^2 - T''^2} \quad \ldots \quad 2)$$

Man kann so das Verhältniss der Potentiale der Spiralen auf sich selbst und ihre Capacitäten bestimmen. Ebenso ergiebt sich bei Anwendung verschiedener Condensatoren bei derselben Spirale das Verhältniss ihrer Capacitäten $c_{\prime}, c_{\prime\prime} \ldots$, wenn die Schwingungsdauer ohne und mit denselben T, $T_{\prime}$, $T_{\prime\prime}$ u. s. f. sind:

$$\frac{c_{\prime\prime}}{c_{\prime}} = \frac{T_{\prime\prime}^2 - T^2}{T_{\prime}^2 - T^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

so dass auch die Verhältnisse der Capacitäten der Condensatoren auf diese Weise zu messen sind. Besitzen die isolirenden Schichten der Inductionsrolle und des Condensators gewisse Leitungsfähigkeiten α und α', so ist die Gleichung für i (§. 194, Gleichung 1) $i = -dq/dt = C dV/dt$ umzuwandeln in

$$i = (\alpha + \alpha') V + C \frac{dV}{dt}.$$

Dann ist in Gleichung 1, §. 194 statt des Werthes $r/2P$ der Werth $\frac{1}{2}(r/P + [\alpha + \alpha']/C)$ zu setzen.

Da α jedenfalls sehr klein ist, so kann $r(\alpha + \alpha')$ gegen 1 und auch in dem Werthe für T das $(\alpha + \alpha')$ enthaltende Glied vernachlässigt werden, so dass sich

$$i = I \frac{P_{12}}{P} \frac{T}{\pi} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{P} + \frac{\alpha + \alpha'}{C}\right) t} \sin \frac{\pi}{T} t \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

ergiebt. Die Abnahme der Ladungen bei den einzelnen Maximas folgt dann auch nicht der Reihe $Q, -Qe^{-r\pi/2P\alpha'}$ u. s. f., sondern es ist wiederum für $r/2P$ der oben erwähnte Werth zu setzen. Als Schwingungsdauer kann man entsprechend ohne grossen Fehler, wenn r klein ist, wie in §. 194, den Werth $T = \pi \sqrt{CP}$ annehmen [1]).

283 Die §. 282 entwickelte Formel ist mittelst eines von Helmholtz construirten Commutators von Schiller (l. c.) experimentell geprüft worden.

Auf zwei Platten p und p^1, Fig. 70, deren eine durch eine Mikrometerschraube M verschiebbar war, waren zwei Hebel h und h_1 angebracht, welche sich um die Punkte a und a_1 drehten und durch leichte Federn f und f^1 gegen die Metallspitzen l und l^1 gedrückt wurden, durch welche einerseits die Schliessung eines Stromkreises vermittelt wurde, der

Fig. 70.

die Batterie B und die inducirende Spirale R_1 eines Schlittenapparates enthielt, andererseits ein Kreis geschlossen wurde, welcher die Inductionsspirale R_2 enthält. Dieselbe ist einerseits mit dem Drehpunkt a des Hebels h verbunden, andererseits mit der Erde. Ausserdem ist die Spitze l einmal mit der einen Platte eines Condensators C in Verbindung, des-

1) Vergl. Schiller, Pogg. Ann. 152, p. 535, 1874*.

sen zweite Platte zur Erde abgeleitet ist, sodann auch mit der einen Elektrode eines Thomson'schen Elektrometers E, dessen andere Elektrode gleichfalls mit der Erde in Verbindung steht.

Ein pendelartig aufgehängter Rahmen, welcher durch einen Elektromagnet in horizontaler Lage erhalten wird, schlägt beim Oeffnen des den Magnet erregenden Stromes beim Durchgange durch die verticale Lage mittelst zweier mit Metallplatten belegter Hebel gegen die Platten n und n' der Hebel h und h' und öffnet so nach einander einerseits den inducirenden, andererseits den inducirten Kreis, so dass die Ladung des Condensators C je nach der Stellung des Schiebers M zu verschiedenen Zeiten nach dem Oeffnen des inducirenden am Elektrometer abgelesen werden kann. Diese Zeiten wurden nach der Pouillet'schen Methode der Zeitmessung an einem empfindlichen Differentialspiegelgalvanometer gemessen, durch dessen beide Rollen zwei Ströme von 2 Daniell'schen Elementen von gleicher Intensität I in entgegengesetzter Richtung hindurchgingen. Die beiden Stromkreise waren durch die Hebel h und h' geschlossen. Durch das Zurückwerfen des Hebels h' beim Fallen des Pendels wurde der eine dieser Stromkreise geöffnet und sodann durch das Zurückwerfen des Hebels h auch der andere, so dass der eine der beiden Ströme nur in der Zwischenzeit T zwischen beiden Actionen auf die Nadel des Galvanometers wirkte. Die Ablenkung wurde hierbei bestimmt. Dann wurde die Ablenkung auch bei dauerndem Durchleiten des Stromes I durch die eine Rolle gemessen. Die Zeitdauer τ ergiebt sich dann nach Thl. III, §. 336.

Zuerst wurde durch Bestimmung der Schwingungsdauern an einer Inductionsrolle bei Verbindung derselben mit einem oder mehreren Condensatoren (je zwei in einander gesteckten Reagenzgläsern, die mit Quecksilber gefüllt waren) das Verhältniss der Capacitäten der Rolle und der Condensatoren 1, 1 + 2, 1 + 2 + 3 u. s. f. bestimmt, daraus die Capacität jedes Condensators einzeln berechnet und wiederum dieselbe durch Verbindung desselben mit der Rolle und Messung der Schwingungsdauer beobachtet. So ergab sich z. B.:

Condensator	2	3	4	5	7	3 + 4	5 + 6
Capacität ber.	73,9	80,5	106,1	77,4	75,9	129,9	103,5
Capacität beob.	74,1	80,3	106,2	77,3	75,7	130,1	103,2

Die beobachteten Werthe stimmen, namentlich in Anbetracht der Schwierigkeiten elektrostatischer Messungen, ausnehmend gut mit den berechneten überein.

284 Eine ebenso gute Uebereinstimmung ergab sich, als zuerst bei Verbindung eines Condensators (1) mit einer anderen Inductionsrolle die Capacität dieser letzteren bestimmt, daraus ihre Schwingungsdauer T bei Verbindung mit den anderen Condensatoren berechnet und darauf direct beobachtet wurde. So wurde z. B. gefunden:

Condensator	1 + 2	1 + 2 + 3	1 + ··· 4	1 + ··· 5	1 + ··· 6
T berechnet	80,5	93,6	114,1	122,7	130,3
T beobachtet	80,2	93,5	113,7	122,5	130,5

Die Beobachtung der Abnahme der Maximalladungen, also der Dämpfung, zeigte, dass die Leitungsfähigkeit α' der Rollen nicht ohne Einfluss war. Bei Anwendung von Kohlrausch'schen Condensatoren mit isolirender Luftschicht von verschiedener Capacität, deren Leitungsfähigkeit $\alpha = 0$ ist, liessen sich hiernach die Werthe α' / C und r / P bestimmen.

Wurden die Gläser der Quecksilbercondensatoren mit Schellack überzogen und in den Kreis verschiedener inducirter Rollen eingefügt, so konnten unter Berücksichtigung der Leitungsfähigkeiten derselben und der Rollen α' und α aus den Dämpfungsbeobachtungen bei einzelnen Beobachtungen die Werthe der Dämpfungen bei anderen Combinationen der Condensatoren mit den Rollen berechnet werden. Die Beobachtungen stimmen auch hier ausserordentlich genau mit der Berechnung.

Bei Verbindung mehrerer Inductionsrollen muss man annehmen, dass nicht zugleich die ganze Ladung der einen Rolle sich auch der anderen mittheilt, indem die elektrischen Oscillationen durch Anhäufung von freier Elektricität an den Enden jeder Rolle theils in jeder einzelnen Rolle, theils in allen zusammen stattfinden.

285 Endlich wurde die Capacität einer Anzahl von Condensatoren mit verschiedenen isolirenden Zwischenschichten gemessen und somit die Dielektricitätsconstante der letzteren bestimmt. Hierzu diente ein Condensator von Kohlrausch, zwischen dessen Platten eine möglichst planparallele Platte eines Dielektricums gestellt wurde. Entsprechend der Gleichung 3), §. 282 wurden die Schwingungsdauern T ohne Condensator und mit demselben, mit und ohne Einschaltung des Dielektricums T_{II} und T_I bestimmt. Dann ist das beobachtete Verhältniss der Capacitäten C'' / C' in letzteren beiden Fällen die Dielektricitätsconstante D. Die Ladungsdauer betrug etwa 0,000056 bis 0,00012 Secunden.

Zugleich wurden die Constanten D nach der Bd. I, §. 134 und Bd. II, §. 41 erwähnten Methode von Siemens gemessen. Die Resultate beider Beobachtungsreihen waren:

	Hart-gummi	Kautschuk		Paraffin			Halbweisses Glas		Weisses Spiegel-glas
		reines	vulc.	schnell abgek.	langs. abgek. 1	langs. abgek. 2	1	2	
I D	2,21	2,12	2,69	1,68	1,81	1,89	2,96	3,66	5,78 — 5,88
II D	2,76	2,34	2,94	1,92	2,47	—	4,12	—	6,34

Bei der zweiten Methode dauert die Ladung länger, etwa $^1/_{40}$ bis $^1/_{50}$ Secunde, so dass die Dielektricitätsconstante mit längerer Ladungsdauer grösser wird.

Durch Beobachtung der totalen Reflexion des Lichtes wurden zugleich die Brechungsindices ν dieser Substanzen bestimmt. Es ergab sich:

	Paraffin		Kautschuk
	1	2	
ν	1,53	1,48	1,50
ν^2	2,34	2,19	2,25
D	1,89 — 2,47	1,81 — 1,92	2,12 — 2,34

286 Endlich ergab sich durch Bestimmung der Dämpfung der elektrischen Schwingungen die relative Leitungsfähigkeit α' der isolirenden Schichten des Condensators. Der Condensator wurde einmal mit isolirender Zwischenschicht, sodann ohne dieselbe verwendet; dabei wurden aber die Platten des Condensators so weit an einander geschoben, bis die Schwingungsdauer, also die Capacität c', dieselbe war. Die Dämpfung der Schwingungen ergab, wenn die Capacität der Rolle c, ihre Leitungsfähigkeit α ist, im einen Fall den Werth

$$\frac{r}{A} + \frac{\alpha + \alpha'}{c + c'},$$

im anderen den Werth

$$\frac{r}{A} + \frac{\alpha}{c + c'},$$

woraus sich α' berechnet.

So ist bei Bestimmung von c in absolutem Maass der Widerstand eines Cubikmeters Glas: 9,82 bis 7,52 . 10^7 Ohm. Bei Paraffin, Kautschuk und Luft ergaben sich Dämpfungen, die gleich 0,0445 bis 0,0447, 0,0404 bis 0,0407 und 0,0445 bis 0,0403 waren. Hier ist also keine Leitung zu erkennen. Isolirende Substanzen neben den Rollen übten keinen merklichen Einfluss auf die Schwingungsdauer aus.

Eine Verzögerung des Beginns der Induction (vergleiche den folgenden Paragraphen) nach dem Oeffnen der inducirenden Rolle konnte nicht wahrgenommen werden.

287 Schon früher hatte Blaserna[1]) über die oscillirende Entladung in Inductionsspiralen sehr sorgfältige und ausgedehnte Versuche ange-

[1]) Blaserna, Sul sviluppo e la durata delle correnti d'induzione: Giornale di Science Naturali ed Economiche, 6, Palermo 1870*; Archives des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 38, p. 338, 1870*; Pogg. Ann. Jubelbd. p. 363, 1874*.

stellt und dabei das Resultat erhalten, dass zur Fortpflanzung der Inductionswirkung von einem inducirenden zu einem inducirten Kreise durch die Luft oder einen anderen Nichtleiter eine bestimmte Zeit erforderlich sei.

Zwei Holzcylinder C und C_1, Fig. 71, sind auf eine gemeinsame Axe $x x_1$ aufgeschoben. C ist fest, C_1 lässt sich gegen C um einen an

Fig. 71.

den Theilungen $d d_1$ messbaren Winkel drehen. Beide Cylinder sind mit Blechstreifen o und o_1 von der Gestalt der Zeichnung belegt, und letztere sind mit kleineren metallenen Cylindern c und c_1, welche auf der Axe $x x_1$ befestigt sind, leitend verbunden. Gegen die Cylinder $C C_1$, $c c_1$ schleifen vier Stahlfedern m, M, M_1, m_1, die isolirt von einander sich auf dem Elfenbeinstab $r r_1$ verschieben lassen und dort mit Klemmschrauben verbunden sind. Um den Contact der Stahlfedern völlig sicher zu machen, sind sie an den unteren Theil des Ständers L, Fig. 72, angeschraubt, zu dem die Drahtleitungen führen. Oben tragen sie vorn je eine kleine, abgeflachte Halbkugel P von Platin, mit der sie gegen den Cylinder drücken, hinten einen Knopf s, der sich gegen das Gummiband g anlegt. Durch Anziehen der Schraube v kann die Feder gegen den Cylinder gepresst werden. Der Doppelcylinder wird durch ein Schwungrad mit Treibriemen und eine Zahnradverbindung schnell umgedreht. Die Drehungsgeschwindigkeit (4 bis 60 Umdrehungen in der Secunde) wird durch eine auf seine Axe aufgesetzte Lochsirene gemessen, deren Ton mit dem der verschiedenen Abtheilungen der Saite eines Sonometers verglichen war. Die Schwingungsdauer der letzteren war der einer Stimmgabel von bestimmter Oscillationsdauer gleich gemacht. Wurden

Fig. 72.

$\frac{1}{1}$

sowohl die Federn m, M, wie M_1, m_1 mit zweien constanten Säulen verbunden, in beide Schliessungskreise Galvanometer eingeschaltet, und wurden dann die Cylinder $C\,C_1$ langsam gedreht, so konnte man beobachten, bei welcher Stellung gerade der durch m und M circulirende Strom durch Abgleiten der Feder M von der Kupferbelegung o aufhörte und bei welcher Stellung die Leitung des durch $M_1\,m_1$ geleiteten Stromes durch die Belegung o_1 begann. Wurde nun die Axe schnell gedreht, so konnte man hiernach bestimmen, welche Zeit zwischen der Schliessung resp. Oeffnung der Leitung $m\,o\,M$ und der Leitung $m_1\,o_1\,M_1$ verging. — Dass das Holz der Cylinder nicht leitete, konnte durch Verbindung der Federn M und M_1 mit der Säule und dem Galvanometer nachgewiesen werden.

Durch die Federn $m\,M$ wurde der Strom einer constanten Säule geleitet, in deren Schliessungskreis eine graduirte Tangentenbussole eingeschaltet war. Derselbe Kreis enthielt eine inducirende Spirale S (von 60 Windungen von mit Seide übersponnenem Kupferdraht, gewunden in vier Reihen von je 15 Windungen; Dicke des Drahtes 1,12 mm, Länge der Spirale 18 mm, innerer und äusserer Radius 30,5 und 35 mm). Bei den ersten Versuchen stand dieser Spirale eine gleiche Inductionsspirale gegenüber, welche mit den Federn M_1 und m_1 verbunden war, und deren Schliessungskreis ein graduirtes Galvanometer mit astatischer Nadel enthielt. Wurden die Cylinder C und C_1 so gegen einander gestellt, dass der inducirte Stromkreis in den ersten Momenten nach Schliessung des inducirenden eine längere oder kürzere Zeit durch die auf verschiedenen breiteren oder schmaleren Stellen des Metalls o_1 schleifenden Federn geschlossen wurde, so konnte der Verlauf des Schliessungsinductionsstromes bestimmt werden. Dabei schleifte die Feder M auf einem so breiten Theile von o, dass die Oeffnungsinduction ausgeschlossen war. Bei verschieden schneller Drehung, also bei Verlauf verschieden langer Zeiten zwischen dem Schliessen des inducirenden und inducirten Stromes fanden sich die Resultate der Rechnung von E. du Bois-Reymond (§. 137 u. f.) im Allgemeinen bestätigt. Stets trat indess der Schliessungsinductionsstrom erst einige Zeit nach der Schliessung des inducirenden Stromes auf, so dass z. B., wenn der inducirte Kreis durch einen sehr schmalen, nur 2° breiten Streifen von o_1 geschlossen wurde, bei sehr schneller Drehung der Cylinder kein Inductionsstrom erschien, sondern derselbe sich erst bei langsamerer Drehung plötzlich zeigte, um bei noch langsamerer Drehung wieder zu verschwinden, indem dann die Schliessung durch o_1 erst eintrat, nachdem die inducirende Wirkung mehr oder weniger abgelaufen war.

Wurden zwischen die Spiralen Platten von schlecht leitenden Körpern gebracht, so ergab sich eine noch grössere Verzögerung des Schliessungsinductionsstromes. Derselbe trat nach Schliessung des inducirenden Stromes auf, wenn sich zwischen den Spiralen befand:

Luft, 13 mm dicke Schicht . . .	nach 0,000167	Secunden
Schellack, 12 mm dicke Platte . .	„ 0,000450	„
Schwefel, 12 mm dicke Platte . .	„ 0,000402	„
4 Glasplatten	„ 0,000373	„

Hieraus berechnet Blaserna, dass die Induction sich in einer Secunde in Luft 270, in Glas 61, in Schellack 57 bis 44, in Schwefel 52, in Pech 30 m fortpflanzt, so dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft nahezu der des Schalls gleich wäre.

Für die Induction bei der Oeffnung findet Blaserna ähnliche Resultate. Der Oeffnungsinductionsstrom entwickelt sich und läuft in einer kürzeren Zeit ab, als der Schliessungsinductionsstrom (z. B. in 0,000275 Secunden, während der letztere 0,000485 Secunden braucht). Auch hier soll eine Verzögerung der Induction eintreten; bei Zwischenbringen einer Schellackplatte würde die Verzögerung während des ganzen Verlaufs grösser, also bei gleicher Gesammtintensität des Inductionsstromes seine mittlere Intensität kleiner sein als in der Luft.

Je weiter die Spiralen von einander stehen, desto mehr verzögert sich die Zeit t_m des Eintrittes des Maximums, da mit abnehmendem Potential die Zeit t_m wächst (vergl. §. 139 u. f.).

Zum Studium des Verlaufs der Extraströme wurden die Drahtverbindungen geändert. Um die Schliessungsextraströme zu erhalten, wurden nur die Federn M und m verwendet, und in ihren Schliessungskreis die Säule, die Spirale und das Galvanometer eingeschaltet. Bei der Drehung des Interruptors konnte das Ansteigen des Stromes beobachtet werden. Hätte der Strom eine constante Intensität, so hätte die Ablenkung des Galvanometers unabhängig von der Drehungsgeschwindigkeit constant sein müssen; sie nahm aber bei kurzer Schliessung und schneller Drehung ab. Nie ging indess die Nadel auf Null, so dass hiernach der Strom unmittelbar mit Beginn der Schliessung zu circuliren beginnt. Er steigt erst langsam, dann sehr stark an, fällt wieder schnell und gelangt direct oder nach mehreren Steigungen und Verminderungen der Intensität allmählich zu seiner constanten Intensität. Diese Oscillationen erfolgen um so schneller, je stärker die in die Schliessung eingeschalteten Spiralen den Extrastrom erzeugen.

Ebenso fand Blaserna, als die Schliessung, auch der den Galvanometerspiegel ablenkende Theil derselben, aus geraden, nur in rechten Winkeln gebogenen, im Ganzen 27 m langen Drähten bestand, analoge Oscillationen.

Die Oscillationen hatten anfangs grosse Höhe und kurze Dauer, die späteren waren schwächer und dauerten länger, so dass die Zeiten derselben etwa in einer arithmetischen Progression zweiten Grades lagen, bis die letzten Schwankungen kaum merkbar waren und in den constanten Strom übergingen.

Zur Beobachtung des Oeffnungsextrastromes wird der Strom der Säule durch einen Commutator und die Inductionsspirale geleitet und mit-

telst m und M zum Cylinder C geführt, wo er bei Drehung des Apparates erst geschlossen, dann geöffnet wird. Die Breite des Kupferstreifens o war so gewählt, dass der Strom sich völlig entwickeln konnte. Zugleich wurden von den Enden der Inductionsspirale Drähte zu M_1 und m_1 geführt, so dass beim Oeffnen des Stromkreises auf Cylinder C der in der Spirale erzeugte Extrastrom zugleich mit einem Theil des aus der Kette abgeleiteten Stromes durch M_1, m_1 und Cylinder C_1 sich ausglich. Der letztere Theil konnte eliminirt und bestimmt werden, indem der Interruptor auf C_1 so gestellt wurde, dass er sich schloss, während noch der Contact in C andauerte, und sich öffnete, ehe der letztere geöffnet war. Dabei ergab sich, dass der Oeffnungsextrastrom sich aus einer Anzahl immer schwächer werdender Oscillationen zusammensetzt, welche aber viel schneller erfolgen, als die des Schliessungsextrastromes, und dass der ganze Oeffnungsextrastrom in kürzerer Zeit verläuft, als ersterer (in einem Fall nur 0,00026 Secunden). Die erste Oscillation hat dabei ein viel (25 mal) grösseres Maximum, als die erste Oscillation des Schliessungsstromes.

Wird in die Nähe der primären Spirale während der Schliessung eine in sich geschlossene Spirale gebracht, so ändern sich die in ersterer stattfindenden Oscillationen. Während ohne letztere Spirale deutlich zwei Oscillationen entstehen, zeigt sich mit derselben das erste Maximum nicht, dagegen zeigt sich ein solches in dem inducirten Strome zur gleichen Zeit, wie vorher in dem inducirenden.

288 Die von Blaserna beobachtete Verzögerung der Induction bei Fortpflanzung derselben durch grössere Strecken von Nichtleitern ist von anderen Physikern noch nicht bestätigt, und die Vermuthung ausgesprochen worden, dass möglicher Weise trotz aller Vorsicht durch Schwingungen der Federn seines Apparates unregelmässige Contacte mit dem rotirenden Cylinder hervorgerufen wurden, und etwa bei Zwischenbringung von schlecht leitenden Platten zwischen die Spiralen Ströme auch in jenen Platten inducirt worden waren, welche trotz ihrer Schwäche doch secundär die Inductionserscheinung verzögern könnten. Bernstein[1]) beobachtete u. A. bei den §. 277 angeführten Versuchen, dass, mochte die Inductionsspirale des du Bois'schen Schlittenapparates über die inducirende geschoben oder 12 cm von ihr entfernt sein, der Oeffnungsstrom zu völlig gleicher Zeit begann und die ersten Oscillationen in beiden Fällen vollständig zusammenfielen. Auch die Zwischenstellung von mehreren Glasplatten zwischen die Spiralen änderte dieses Verhalten nicht. Jedenfalls hätte sich eine Verzögerung der Induction, die einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 1200 m in der Secunde entspräche, durch eine Veränderung des zeitlichen Verlaufs der Erscheinung offenbaren müssen. — Auch Helmholtz[2]) hat keine derartige Verzögerung

[1]) Bernstein, Pogg. Ann. 142, p. 72, 1871*. — [2]) Helmholtz, Monatsber. d. Berl. Akad. 1871, 25. Mai, p. 292*. Siehe auch die Polemik von Cazin, Compt. rend. 78, p. 65, 1874* und Blaserna, ibid. p. 346*.

der Inductionswirkung beobachtet. Zwei ringförmige Spiralen von 80 cm Durchmesser, die eine inducirende von $12^1/_4$ Windungen von 1 mm dickem, mit Guttapercha überzogenem Kupferdraht, die andere inducirte von 560 Windungen von $^1/_2$ mm dickem, mit Seide übersponnenem Kupferdraht waren in einem Abstande von 34 bis 170 cm einander gegenübergestellt. In den Kreis der inducirenden Spirale war das eine Unterbrechungshebelchen des §. 275 beschriebenen Apparates eingeschaltet. Das eine Ende der inducirten Spirale war mit der festen, zur Erde abgeleiteten Metallplatte eines Kohlrausch'schen Condensators (Thl. I, §. 169, Fig. 50) verbunden, dessen Platten $^3/_8$ mm von einander entfernt waren; das andere Ende war mit der beweglichen Platte des Condensators unter Einschaltung des zweiten Unterbrechungshebelchens verbunden. Beim Niederfallen des Pendels wurde der inducirende Kreis geöffnet. Der in der inducirten Spirale erzeugte Elektricitätsstrom lud die bewegliche Platte des Condensators, bis das zweite Hebelchen vom Pendel getroffen wurde. Die Grösse der Ladung der Platte wurde nach Entfernung von der festen Platte an einem Thomson'schen Elektrometer gemessen. Die Oscillationen der Entladung bei 34 cm Abstand der Spiralen wurden hierbei bis zur 35 sten positiven und negativen beobachtet, wobei die Dauer jeder Entladung $^1/_{2811}$ Secunde betrug. Die Veränderung der Entfernung der Condensatorplatten, d. h. die Capacität des Condensators beeinflusste nur sehr wenig die Oscillationsdauer.

Da der Oeffnungsfunken der inducirenden Spirale eine Zeit andauert, also die Oeffnung allmählich geschieht, ist in Folge dessen der Abstand des ersten Anfangs der Induction, d. h. der erste Nullpunkt der die Oscillation darstellenden Curve (für welche die Abscissen die Zeiten, die Ordinaten die Intensitäten des Stromes in jedem Moment angeben) von dem zweiten Nullpunkt grösser, als der Abstand der folgenden Nullpunkte von einander. Diese Verlängerung der Zeit der ersten ganzen Oscillation oder die Funkendauer beträgt etwa die Zeit von $^1/_{80}$ Oscillation. Aus diesen Beobachtungen lässt sich indess noch kein Schluss darauf ziehen, dass die Inductionswirkung eine bestimmte Zeit braucht, um sich von der inducirenden zur inducirten Spirale fortzupflanzen, denn bei Aenderung des Abstandes der Spiralen bis 136 cm veränderte sich die Lage der Nullpunkte des inducirten Stromes nicht um $^1/_{231170}$ Secunde. Die Inductionswirkung müsste sich also jedenfalls mit einer grösseren Geschwindigkeit, als 314 400 m in der Secunde, fortgepflanzt haben.

Auch Mouton (§. 281) und Schiller (§. 283) konnten keine Verzögerung des Beginns der Induction wahrnehmen.

289 Der zeitliche Verlauf der Inductionsströme muss beachtet werden, wenn man, wie bei den Versuchen von Werner Siemens (Bd. I, §. 134), die Capacität eines Condensators durch abwechselnde Verbindung mit einer Säule von bekannter elektromotorischer Kraft und Entladung durch ein Galvanometer von bekanntem Reductionsfactor bestimmt. Zwischen

einer Entladung und Ladung und umgekehrt müssen die in der Leitung inducirten Ströme vollständig abgelaufen sein. Die Formel für die Entladung ist in §. 194 gegeben. Für die Ladung ist dem Werthe q nur das Glied $\dot{E}C$ hinzuzufügen, wo E die elektromotorische Kraft der Säule ist.

Durch Rechnung und Versuche hat Aron[1]) gezeigt, dass, wenn die Dauer eines Contactes nur $^1/_{500}$ (resp. $^1/_{90}$) Secunde, der Widerstand der Leitung 2,7 Q.-E. ist, die Abweichungen von der Formel $I = nCE$, wo n die Zahl der Ladungen und Entladungen in der Secunde, I die Intensität bezeichnet, völlig verschwinden, wie dies auch aus den Versuchen von Siemens unter Anwendung verschiedener Werthe von n hervorgeht. Wird das Potential der Leitung auf sich selbst sehr gross, indem man z. B. die secundäre Rolle eines Inductoriums und sehr grosse Widerstände von grosser Capacität einschaltet, so kann die Stromstärke der Condensatoren sich ändern, wie z. B. bei Telegraphenkabeln. Dies hat auch Aron unter Anwendung einer Batterie von einer oder mehreren verschieden grossen Flaschen beobachtet. Die Ausschläge liessen sich durch die Formel $\alpha' = \alpha(1 - e^{-\frac{2t}{rC}})$ darstellen, wo t die Dauer jedes einzelnen Contactes ist.

IV. Zeit zum Entstehen und Verschwinden des Magnetismus. Anomale Magnetisirung.

1. Zeitlicher Verlauf der Magnetisirung.

290 Magnetisirt man eine Eisenmasse, sei es durch Einwirkung des Erdmagnetismus oder eines Magnetes, sei es durch Einwirkung einer Magnetisirungsspirale, so vergeht eine gewisse Zeit, ehe das Eisen das Maximum des durch die einwirkenden Kräfte in ihm zu erregenden Magnetismus angenommen hat; ferner verliert nach dem Aufhören jener Kräfte das Eisen nur allmählich den Magnetismus.

Diese Erscheinung kann einen doppelten Grund haben.

Einmal können die Molecüle des Eisens eine gewisse Zeit brauchen, um den jedesmal auf sie wirkenden magnetischen Kräften in die ihnen dadurch gebotenen Lagen zu folgen und nach Aufhebung derselben in ihre unmagnetischen Gleichgewichtslagen zurückzukehren; ähnlich wie auch ein Stab, welcher durch mechanische Kräfte gebogen oder tordirt wird, erst nach einiger Zeit das Maximum seiner Torsion und Biegung, und nach Entfernung der seine Gestalt verändernden Kräfte erst allmählich die neue, permanent veränderte Gestalt annimmt.

[1]) Aron, Pogg. Ann. 159, p. 587, 1876*.

Für diese Annahme haben wir noch keine Beweise. Die Versuche, nach denen eine über einer rotirenden Eisenplatte aufgehängte Magnetnadel der Rotation viel schneller folgt, als über einer rotirenden Kupferplatte, woraus man auf ein Andauern des Magnetismus in den jeweilen unter der Nadel hindurchgegangenen Theile der Eisenplatte schloss, sind nicht beweiskräftig (siehe das Capitel „Induction in körperlichen Leitern".

Zweitens werden in der Magnetisirungsspirale beim Beginn und beim Aufhören des magnetisirenden Stromes Extraströme und in der Masse des Eisens selbst Inductionsströme erzeugt, welche dieselbe Erscheinung zur Folge haben. Es werde z. B. ein Eisenstab in eine Spirale eingelegt und dieselbe mit der Säule verbunden. Dann werden zunächst in ihr Extraströme erzeugt, welche das Ansteigen des magnetisirenden Stromes und mithin auch die temporäre Magnetisirung des Eisens bis zu einem Maximum verzögern. Ebenso entstehen in der Eisenmasse beim Ansteigen des Stromes ihm entgegengerichtete Inductionsströme, welche in gleicher Weise wirken.

Zugleich werden rückwärts durch das Ansteigen des Magnetismus in der Magnetisirungsspirale Extraströme inducirt, welche, ebenso wie die durch die Wirkung der Spirale auf sich selbst in ihr inducirten Extraströme, das Ansteigen des Stromes in ihr verzögern. Der Magnetismus steigt demnach langsamer an, als ohne Einfluss der Inductionsströme.

Ebenso sind die in der Eisenmasse beim Oeffnen des magnetisirenden Stromes erzeugten Inductionsströme dem ersteren gleichgerichtet und ertheilen dem Eisenkern von Neuem temporären Magnetismus in dem Moment, in welchem er seinen, durch den magnetisirenden Strom erzeugten temporären Magnetismus schon verloren haben sollte; derselbe verschwindet daher noch nicht im Moment des Oeffnens, sondern erst nach einiger Zeit.

Indem ferner die an der Oeffnungsstelle der Magnetisirungsspirale durch den Oeffnungsextrastrom in besonderer Dichtigkeit angehäuften Elektricitäten sich durch die Spirale rückwärts entladen, kann auf den Magnet ein dem magnetisirenden entgegengesetzt gerichteter Strom wirken, welcher ihn theilweise oder ganz entmagnetisirt oder seine Polarität umkehrt.

Liegen in der Nähe der magnetisirten Eisenmassen noch in sich geschlossene, dieselben umgebende Spiralen oder Metallmassen, so werden auch in ihnen beim Entstehen und Vergehen des magnetisirenden Stromes und des Magnetismus des Eisenkernes Ströme inducirt, welche dem Strom in der Magnetisirungsspirale und den Molecularströmen des Eisenkernes entgegengerichtet oder gleichgerichtet sind; im ersteren Falle also die entstehende temporäre Magnetisirung des Eisenkernes vermindern, im zweiten die abnehmende Magnetisirung vermehren und so auch die Zeitdauer des Entstehens und Vergehens des Magnetismus verlängern.

291 Die Verzögerung der Magnetisirung des Eisens bei Einwirkung einer vom Strome durchflossenen Magnetisirungsspirale, welche von den in der Eisenmasse und den umgebenden Metallmassen und in der Magnetisirungsspirale selbst inducirten Strömen herrührt, ist vielfältig beobachtet worden. Die Elektromagnete, namentlich wenn ihre Eisenmasse bedeutend ist, erhalten erst einige Zeit, nachdem ihre Magnetisirungsspiralen mit der Säule verbunden worden sind, ihre volle Tragkraft. Vorher lässt sich der Anker auf ihnen hin- und herziehen und abreissen.

Auch die Drehung der Polarisationsebene in einem durchsichtigen, zwischen die Pole des Magnetes gestellten Körper tritt in Folge dieser langsamen Zunahme der Magnetisirung erst einige Zeit nach der Schliessung des magnetisirenden Stromes in voller Stärke hervor [1]) und man könnte aus ihrem allmählichen Anwachsen die Zunahme des Momentes des Magnetes mit der Zeit bestimmen [2]).

Setzt man auf den einen Pol eines Elektromagnetes ein Glas voll Wasser, in welchem Eisenoxydoxydul suspendirt ist, so fällt dieses erst einige Zeit nach Schliessung des magnetisirenden Stromes zu Boden [3]).

Auch Page [4]) beobachtete, dass erst etwa eine halbe bis drei viertel Secunden nach dem Schliessen des Stromkreises einer, um einen Eisenmagnet gewickelten Spirale der beim Oeffnen des Stromkreises entstehende Oeffnungsfunken ein Maximum der Helligkeit erreicht; so dass also erst dann der Magnetismus des Eisenkernes ein Maximum erlangt hat, und beim Verschwinden desselben in der umgebenden Spirale der stärkste Strom erzeugt wird.

Ebenso ist eine Zeit für die Aenderung der Magnetisirung eines hufeisenförmigen Elektromagnetes beim Auflegen des Ankers erforderlich. Legt man den Anker mit seinem einen Ende auf die eine Polfläche und schlägt mit seinem anderen Ende schnell auf die andere Polfläche, so kann man es sogleich wieder von derselben abheben. Bei längerer Berührung mit den beiden Polflächen haftet der Anker indess ganz fest. — Dasselbe fand Sinsteden [5]) an einem Stahlmagnet, welcher 110 Pfund trug.

292 Ebenso ist zum Verschwinden des temporären Magnetismus eines Elektromagnetes eine gewisse Zeit erforderlich.

So gaben bei dem Versuche von Page [6]) die den Magnet umgebenden Spiralen noch etwa eine halbe Secunde nach dem Unterbrechen der Verbindung mit der Säule bei directer Verbindung ihrer Enden Funken.

Auch zur Umkehrung des Magnetismus eines Magnetes ist eine längere Zeit erforderlich.

---

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 19, §. 2170, 1846* und 3, p. 466, 1846*. — [2]) Bichat, Ann. scient. de l'école normale, [2] 10, p. 277, 1873*. — [3]) Plücker, Pogg. Ann. 94, p. 40, 1855*. — [4]) Page, Amer. Journ. [2] 11, p. 66*; Krönig's Journ. 1, p. 249, 1851*. — [5]) Sinsteden, Pogg. Ann. 92, p. 227, 1854*. — [6]) Vergleiche auch Quet, Compt. rend. 35, p. 749, 1852*.

Erregt man die beiden Pole eines starken Elektromagnetes nicht gleich stark, legt Halbanker darauf, welche mit konisch zugespitzten Flächen einander gegenüber stehen und bedeckt dieselben mit einer Glasplatte, so legen sich darauf gestreute Eisenfeile in die Verbindungslinie der beiden Polspitzen. Kehrt man dann den den Magnet erregenden Strom so um, dass der früher schwächer erregte Pol der stärkere wird, so bemerkt man erst etwa zwei Secunden nach dem Wechsel der Richtung des Stromes eine Bewegung der Eisenfeile [1]).

293 Die Verzögerung des Entstehens und Vergehens des Magnetismus hat auf die Bildung der Inductionsströme in den die Eisenkerne umgebenden Spiralen entsprechenden Einfluss. Jene Inductionsströme dauern an, so lange sich der Magnetismus des Eisens ändert. Sie besitzen dieselbe Gesammtintensität, wie wenn der Magnetismus des Eisens plötzlich entstände oder verginge, ihre Zeitdauer ist aber verlängert. Der Schliessungsextrastrom in der magnetisirenden Spirale selbst dauert also bei Einlegen eines Eisenkernes in dieselbe längere Zeit, als ohne denselben. Dies zeigen unter anderem die schon §. 163 citirten Versuche von Rijke. — Beim Oeffnen des Stromes der Magnetisirungsspirale dauert dann auch noch der Oeffnungsextrastrom einige Zeit an. Ebenso verlaufen beim Herumlegen einer Inductionsspirale um die magnetisirende Spirale die in derselben beim Schliessen und Oeffnen des magnetisirenden Stromes inducirten Ströme eine gewisse Zeit lang und verändern danach ihre Wirkungen [2]).

Legt man Eisenmassen in die inducirende Spirale, so kann eine ziemliche Zeit zwischen dem Oeffnen des inducirenden und Schliessen des inducirten Stromkreises vergehen, und dennoch bemerkt man in letzterem einen Inductionsstrom in der Richtung des Oeffnungsstromes.

Beim Schliessen des inducirten Kreises nach dem Schliessen des inducirenden entsteht, wenn in die Spiralen Eisenkerne eingelegt sind, nach den übereinstimmenden Versuchen von E. du Bois-Reymond (l. c.) und Matteucci, ein Inductionsstrom, dessen Richtung der des Schliessungsstromes entspricht. Dieser Strom ist dadurch hervorgerufen, dass der Magnetismus der Eisenkerne sich nur langsam entwickelt. Bei massiven Eisenkernen ist die Intensität dieses Stromes bedeutender als bei einem Bündel dünner Eisendrähte.

294 Es ist zu untersuchen, ob bei der Elektromagnetisirung des Eisens hauptsächlich die Trägheit seiner Molecüle, welche nur langsam ihre jedesmalige Lage verlassen, oder die magnetisirende Wirkung der in seiner Masse und in den umgebenden Metallmassen oder Spiralen erregten Inductionsströme die Verzögerung der Aenderungen des temporären Magnetismus bedingt.

---

[1]) Plücker, l. c. — [2]) Vergleiche Quet, l. c.

Zunächst lässt sich nachweisen, dass der letztere Grund der überwiegende ist. Denn untersucht man einmal nach der von Helmholtz[1]) (§. 126) angegebenen Methode die Dauer des Oeffnungsextrastromes in einer mit einer Säule verbundenen Spirale, während in dieselbe ein Bündel von ganz dünnen (0,123 Linien dicken), lackirten Eisendrähten eingelegt wird, in dessen Masse keine Inductionsströme entstehen können, so dauert der Strom nach dem Oeffnen gar nicht an, gerade wie ohne Einlegen von Eisendrähten (§. 288). Werden die Eisendrähte aber dicker genommen, so dass in ihnen Inductionsströme entstehen können, so dauert der Oeffnungsstrom über die Zeit des Oeffnens hinaus.

Alle Ursachen sodann, welche die Bildung von Inductionsströmen in der elektromagnetischen Eisenmasse oder den sie umgebenden Metallhüllen oder Spiralen beim Beginn und Aufhören ihrer Magnetisirung hindern, also die durch jene Ströme bewirkte Verlangsamung der Aenderungen ihres magnetischen Momentes vermindern, bedingen zugleich, dass die Inductionsströme, welche bei jenen Aenderungen in den die Eisenmassen umgebenden Spiralen inducirt werden, einen schnelleren Verlauf nehmen. Ihre physiologischen und magnetisirenden Wirkungen werden also bei sonstigen gleichen Aenderungen des Momentes der Eisenkerne dadurch gesteigert.

295 Dies zeigt sich zuerst bei Untersuchung der Extraströme in den Spiralen. Legt man in eine Drahtspirale einen massiven Eisenkern, verbindet die Enden derselben mit den Polen einer Säule und mit zwei metallenen Handhaben, welche man mit den Händen ergreift, so ist die Erschütterung, welche man beim Loslösen der Säule von der Spirale erhält, in Folge des langsamen Verschwindens des Magnetismus nicht so bedeutend, als man es nach der Stärke der Magnetisirung des Eisens erwarten sollte. Indess muss doch die durch die Inductionsströme in der Eisenmasse erzeugte neue Magnetisirung geringer sein, als die Abnahme der letzteren im Moment des Oeffnens, denn sonst würde das Einlegen des Eisenkernes die physiologische Wirkung überhaupt nicht verstärken.

Wendet man dagegen an Stelle des massiven Eisenstabes ein Bündel von Eisendrähten an, welche einzeln lackirt oder in Wachs eingeschmolzen, oder einfacher nur durch eine Lampenflamme gezogen und so mit einer schlecht leitenden Oxydoxydulschicht bedeckt sind, so kann in ihnen kein so starker inducirter Strom entstehen, wie in dem massiven Eisenkerne. Die physiologische Wirkung des Extrastromes der Spirale beim Oeffnen ist daher stärker. Dies wurde zuerst von Sturgeon und Bachhoffner[2]) beobachtet. Nach Magnus[3]) findet es sogar

---

[1]) Helmholtz, Pogg. Ann. **83**, p. 535, 1851*. — [2]) Sturgeon u. Bachhoffner, Annals of Electricity, **1**, p. 481*. — [3]) Magnus, Pogg. Ann. **48**, p. 95, 1839*.

noch statt, wenn man sich durch die Ablenkung der Nadel einer Bussole in der Nähe der Spirale überzeugt hat, dass das Eisendrahtbündel durch die magnetisirende Wirkung des Stromes in der Spirale ein etwas schwächeres magnetisches Moment erhalten hat, als der massive Eisenkern.

Werden die Drahtbündel in leichtflüssiges Metall eingegossen, so kann jetzt ein Inductionsstrom zu Stande kommen; sie wirken, nach Magnus, ebenso wie massive Kerne.

Werden die Drahtbündel in eine Röhre von leichtflüssigem Metall, von dünnem Messingblech eingelegt, so entsteht in derselben beim Oeffnen des Stromkreises der Spirale durch das Verschwinden des Stromes und des Magnetismus der Eisendrähte gleichfalls ein inducirter Strom, welcher die Eisendrähte von Neuem magnetisirt. Hierdurch wird der Oeffnungsextrastrom in der Spirale verzögert und seine physiologische Wirkung geschwächt. — Je schlechter der Stoff der Röhre leitet, eine desto geringere Intensität besitzt der Inductionsstrom in derselben, desto geringer ist seine schwächende Wirkung. Deshalb vermindert z. B. eine Röhre von Neusilberblech viel weniger die physiologische Wirkung, als eine Messingröhre. — Werden die Röhren der Länge nach aufgeschlitzt, so kann kein Inductionsstrom in ihnen entstehen; das Drahtbündel wirkt wie ohne Röhre.

Spiralig gewundene Eisenbleche, welche nicht in sich geschlossen sind, verstärken nach Magnus (l. c.) die physiologische Wirkung der Extraströme beim Einsenken in eine Spirale fast eben so stark, wie die Drahtbündel; hohle, dünne, in sich geschlossene Eisenblechröhren bedeutender als massive Eisencylinder und Flintenläufe, da ihr temporärer Magnetismus nicht viel kleiner ist, als der der letzteren, die Inductionsströme in ihnen aber eine geringere Intensität besitzen. Werden die Eisenröhren aufgeschlitzt, so wird dadurch namentlich bei dickeren Röhren ihre, den Extrastrom der Spiralen verstärkende Wirkung bedeutend gesteigert. — Werden in solche aufgeschlitzte Eisenröhren noch Eisendrahtbündel gelegt, so werden auch diese durch den Strom in der Spirale magnetisirt und addiren ihre inducirende Wirkung zu der des Eisenrohres bei der Bildung des Extrastromes in der umgebenden Spirale. Bei einem geschlossenen Eisenrohre von etwas dickerem Metall verstärken dagegen eingelegte Eisendrahtbündel die Intensität des Extrastromes nicht, da, wie wenn das Bündel mit Röhren von nicht magnetischem Metall umgeben ist, durch Verschwinden des Magnetismus der Eisendrähte Inductionsströme in der Eisenröhre inducirt werden, durch deren Rückwirkung auf die Spirale die Verstärkung der Extraströme in derselben durch die Drahtbündel fast vollständig compensirt wird.

Die eben erwähnten, an den Extraströmen zu beobachtenden Erscheinungen kann man deutlicher zeigen, wenn man die Verbindung und die Loslösung der Säule von der, die Eisenkerne enthaltenden und mit dem Körper verbundenen Spirale oft hinter einander mit Hülfe des Bd. I,

Fig. 113, §. 323 gezeichneten Interruptors herstellt. — Man kann hierzu auch den Bd. IV, §. 46, Fig. 13 gezeichneten Apparat verwenden, in dessen Spirale man die verschiedenen Eisenkerne einlegt.

296 Einige andere, an Extraströmen beobachtete Erscheinungen, welche auf denselben Ursachen beruhen, wie die beschriebenen, sind die folgenden.

Umwindet man die Schenkel eines hufeisenförmigen Elektromagnetes mit einer langen Drahtspirale, legt auf den Magnet den Anker und verbindet die Enden der Spirale durch einen Commutator erst mit einer Säule und dann mit einem Galvanometer, so weicht die Nadel desselben in der gleichen Richtung aus, wie wenn der durch die Spirale fliessende Strom sie abgelenkt hätte. — Bei Anwendung eines 1400 Fuss langen Spiraldrahtes konnte Magnus[1]) einen Ausschlag der Nadel erhalten, als die Spirale schon 10 Secunden von der Säule losgelöst war und dann erst mit dem Galvanometer verbunden wurde.

Bei Umwindung des Magnetes mit einer kürzeren Drahtspirale nimmt die Dauer des Phänomens ab. Wird der Anker nicht auf den Magnet gelegt, so zeigt sich die Erscheinung nicht.

297 Die längere Dauer des inducirten Stromes lässt sich auch auf eine andere Weise zeigen.

Bringt man auf die Schenkel des Elektromagnetes Spiralen mit langem Drahte und verbindet sie mit den Polen der Säule, während gleichzeitig in den Schliessungskreis ein Galvanometer mit astatischer Nadel eingeschaltet ist, so weicht die Nadel desselben stark ab. Schaltet man durch Umlegen des Commutators die Säule aus dem Schliessungskreise aus und schliesst denselben dafür durch einen Metalldraht, so geht die Nadel des Galvanometers plötzlich auf Null zurück. Nicht so ist es, wenn der Anker auf den Elektromagnet aufgelegt ist. Dann kehrt die Nadel bei dem Umlegen des Commutators nur langsam in ihre Ruhelage zurück. In der Schliessung bleibt also noch längere Zeit ein inducirter Strom bestehen. — Ist der Draht kurz, welcher den Elektromagnet umgiebt, so kann man diese Dauer des inducirten Stromes nicht beobachten.

Auch hier wird beim Verschwinden des Magnetismus in der längeren Spirale ein Strom von grösserer elektromotorischer Kraft inducirt, welcher, selbst wenn der Widerstand der Spirale so gross ist, dass seine Intensität nur die gleiche ist, wie bei einer kürzeren Spirale, dennoch im Verhältniss zu der Windungszahl auf den Eisenkern stärker magnetisirend zurückwirkt, als der Strom in der kürzeren Spirale.

298 Die Wirkung des Ankers beruht darauf, dass die einzelnen Molecüle des Magnetes durch seine Rückwirkung bei gleicher magnetisiren-

[1]) Magnus, Pogg. Ann. 38, p. 427, 1836*.

der Kraft stärker in ihre magnetischen Lagen gerichtet werden, als ohne denselben. Wenn sie daher beim Aufheben der magnetisirenden Kraft in ihre unmagnetischen Gleichgewichtslagen zurückzukehren streben, so ertheilen die dabei in der umgebenden Spirale und in der Masse des Eisens inducirten Ströme dem Magnet von Neuem viel stärkeren Magnetismus, als wenn derselbe nicht mit dem Anker armirt ist. Im ersteren Falle erfolgt so die Abnahme des Magnetismus viel langsamer.

Kehrt man ferner durch einen Gyrotrop die Richtung des Stromes um, welcher durch die Magnetisirungsspirale eines Magnetes geleitet wird, der mit einem nicht zu schweren Anker versehen ist und mit seinen Schenkeln nach unten hängt, so bleibt der Anker haften, wenn die Magnetisirungsspirale kurz ist. Im gegentheiligen Falle fällt er ab. — Im ersteren Falle sind die Inductionsströme schwach, welche das Verschwinden und das Auftreten des Magnetismus verzögern. Unmittelbar beim Umschlagen des Gyrotrops tritt auch die umgekehrte Magnetisirung des Magnetes in voller Kraft ein, der Anker kann sich im Augenblick des Verschwindens des Magnetismus nur so weit vom Magnete entfernen, dass er durch dessen neu entstehenden Magnetismus wieder zu demselben herangezogen wird. — Treten aber, wie bei Anwendung längerer Inductionsspiralen, beim Umlegen des Gyrotrops stärkere Inductionsströme auf, so besteht zuerst der Magnetismus in Folge des Oeffnungsstromes fort; der Anker wird noch stark angezogen. Dann aber verschwindet der frühere und entsteht der neue, entgegengesetzte Magnetismus nur allmählich. So besitzt der Magnet längere Zeit hindurch eine sehr geringe Stärke, während welcher der Anker sich zu weit vom Magnete entfernt, als dass er bei dem Auftreten seiner ganzen neuen Magnetisirung wieder angezogen werden könnte [1]).

Aehnliche Resultate ergeben sich auch bei Beobachtung der physiologischen Wirkungen des Extrastromes der Spiralen, welche einen hufeisenförmigen Elektromagnet umgeben [2]). **299**

Legt man auf das Hufeisen einen die Schenkel verbindenden Anker, so wird zwar die Einstellung der magnetischen Theilchen hierdurch befördert, und das gesammte magnetische Moment des Hufeisenelektromagnetes nimmt zu. Beim Oeffnen des Stromes behält derselbe aber nicht nur für sich schon einen bedeutenden remanenten Magnetismus, sondern der letztere wird durch die im Moment des Oeffnens in seiner Masse auftretenden Inductionsströme noch so gesteigert, dass in jenem Moment die Magnetisirung eher noch zu-, als abnimmt. Man erhält daher nur eine sehr schwache physiologische Wirkung. Ist die Inductionsspirale lang, so giebt sie für sich, ohne Einlegen des mit dem Anker ge-

[1]) Vergl. P. M. Phil. Mag. [3] **3**, p. 19, 1833*. Magnus, Pogg. Ann. **38**, p. 433, 1836*. — [2]) Magnus, l. c. p. 417, 1836*.

schlossenen Hufeisenmagnetes, eine stärkere Erschütterung, als mit demselben, da nun die Ursache der Verzögerung fortfällt. Dass diese Verzögerung nicht allein durch die directe Rückwirkung der im Elektromagnet inducirten Ströme auf die umgebende Spirale bedingt ist, sondern vielmehr durch die in Folge jener Ströme bewirkte neue Magnetisirung des Magnetes im Moment des Oeffnens, zeigt sich, wenn man statt des eisernen Hufeisens in die Inductionsspirale ein ganz ebenso gestaltetes Hufeisen von Zink mit einem Anker von Zink einlegt. Durch diese werden die Erschütterungen, welche die Spirale allein giebt, nicht vermindert.

Behält man nach dem Oeffnen des Stromes die Handhaben der Magnetisirungsspirale in der Hand, während der mit seinem Anker geschlossene Elektromagnet in ihr liegt, und reisst nun den Anker ab, so erhält man eine sehr starke Erschütterung, da jetzt der remanente Magnetismus des Magnetes verschwindet. Sie ist noch stärker, wenn man die Enden der Spirale durch einen metallischen Leiter verbindet und ihn unterbricht, während man gleichzeitig den Anker des Magnetes abreisst. Man erhält in diesem Falle die Erschütterung durch den jedenfalls nur sehr kurze Zeit andauernden Extrastrom, welcher entsteht, wenn der beim Verschwinden des remanenten Magnetismus des Hufeisens in der Spirale inducirte Strom während seines Laufes durch die metallische Schliessung unterbrochen wird.

300 Der folgende Versuch schliesst sich den erwähnten unmittelbar an. Man umwindet die beiden Schenkel eines hufeisenförmigen Elektromagnetes mit Spiralen, deren eine Enden mit einander verbunden sind, deren andere Enden in Quecksilbernäpfe tauchen, welche mit den Polen der Säule in Verbindung stehen, und in die Drähte eingesenkt sind, welche Handhaben tragen. Man erhält dann nach Magnus (l. c.) beim Herausheben der Poldrähte der Säule aus den Quecksilbernäpfen durch den dabei erzeugten Inductionsstrom nahezu gleich starke Erschütterungen, mögen die Schenkel des Hufeisens im gleichen oder entgegengesetzten Sinne durch den Strom in den Spiralen magnetisirt worden sein; obgleich im ersten Falle das Hufeisen eine bedeutende, im letzten keine merkliche Tragkraft besitzt. — Wenn auch der in jedem Schenkel des Hufeisens erregte Magnetismus im ersten Falle grösser ist, als im zweiten, da die einzelnen magnetischen Molecüle beider Schenkel durch ihre gegenseitige Wirkung sich stärker in die magnetische Einstellung begeben, so verschwindet doch in diesem Falle, wo sie auch nach Aufhebung des magnetisirenden Stromes in ihren Lagen zum Theil verharren, der Magnetismus der Schenkel langsamer und weniger vollkommen, als im zweiten, wo die Molecüle beider Schenkel ihre ungleichnamigen Pole einander zukehren und dann nach Aufhebung der magnetisirenden Kraft durch ihre Wechselwirkung in die unmagnetischen Gleichgewichtslagen zurückgeführt werden.

301 Ganz analoge Erscheinungen, wie an den Extraströmen, zeigen sich auch, wenn man den primären Strom durch eine inducirende Spirale mit wenigen Drahtwindungen leitet, darüber eine Inductionsspirale mit vielen Windungen von dünnem Draht wickelt und deren Enden durch Handhaben mit dem Körper verbindet. Beim Einlegen von Eisenstäben, Drahtbündeln, Eisenröhren u. s. f. und Oeffnen des Schliessungskreises des primären Stromes sind auch hier die physiologischen Wirkungen des in der Inductionsspirale inducirten Stromes in gleicher Weise abgeändert, wie die unter gleichen Bedingungen in der magnetisirenden Spirale selbst inducirten Extraströme. — Legt man die verschiedenen §. 295 beschriebenen Eisenkerne mit oder ohne Blechhüllen in die inducirende Spirale des Schlittenapparates von E. du Bois-Reymond (§. 5) ein, schiebt die Inductionsspirale über dieselbe und verbindet ihre Enden durch Handhaben mit dem Körper, so kann man beim Hindurchleiten eines Stromes durch den Apparat diese Erscheinungen studiren.

302 Wie wir schon §. 158 u. f. bei dem Einschieben nicht magnetischer Metallmassen zwischen die auf einander inducirend wirkenden Spiralen beobachteten, haben die Inductionsströme, welche in den in jene Spiralen eingeschobenen Eisenmassen inducirt werden und das Entstehen und Vergehen ihrer Magnetisirung verzögern, nur einen Einfluss auf die physiologischen, elektrodynamischen, thermischen u. s. f. Wirkungen der Inductionsströme in der Inductionsspirale, nicht aber auf ihr galvanometrisches Verhalten, da bei endlichem Verschwinden des ganzen Magnetismus die Gesammtintensität der in den Spiralen inducirten Ströme bei gleichem Moment der Eisenmassen unter verschiedenen Umständen sich gleich bleiben muss, wobei immer vorausgesetzt wird, dass die Dauer des Verlaufs der Inductionsströme gegen die Schwingungsdauer der Galvanometernadel klein ist.

303 Dies hat auch Dove vermittelst des §. 254 beschriebenen Differentialinductors nachgewiesen.

In die eine Röhre dieses Apparates wurde ein Eisencylinder, ein Eisenrohr u. s. f. eingelegt, in die andere eine solche Anzahl Eisendrähte von 1 mm Dicke, dass die entgegenlaufenden Inductionsströme in beiden Spiralen einmal am Galvanometer keine Ablenkung hervorbrachten; dann dass sie dem eingeschalteten menschlichen Körper keine Erschütterung ertheilten.

Auf diese Weise compensirten folgende Zahlen der Eisendrähte den einen oder anderen Einfluss der in die eine Röhre des Apparates eingelegten Körper:

	Für das Galvanometer	Für die Erschütterung
Stab von Schmiedeeisen	über 110 Drähte	15
Graueisen aus dem Tiegelofen .	92 „	24
Weicher Stahl	91 „	9
Weisses Eisen (Tiegelguss) . .	41 „	10
Harter Stahl	28 „	7

Zur Compensation der galvanometrischen Wirkung sind demnach mehr Drähte erforderlich, als für die Erschütterungen. Bei gleicher galvanometrischer Wirkung, d. i. bei gleichem magnetischen Moment der Eisenbündel und Stäbe ist also, ganz entsprechend den Erfahrungen des §. 295, die Erschütterung durch die die Drahtbündel enthaltende Spirale grösser, als durch die die massiven Eisen- und Stahlstäbe enthaltende. Je geringer die Continuität der Masse der Eisenkerne ist, desto geringer ist der Unterschied zwischen der Zahl der Eisendrähte, welche in beiden Fällen für die Compensation erforderlich sind.

304 Die verschiedene Dauer der Inductionsströme in den massiven Kernen und Drahtbündeln bemerkt man recht deutlich, wenn man in die beiden Rollen des Differentialinductors einen massiven Eisenstab und ein Bündel Eisendrähte einlegt und die Zahl der letzteren zuerst so gross nimmt, dass die galvanometrische Wirkung des Inductionsstromes der sie enthaltenden Rolle überwiegt. Entfernt man dann die Eisendrähte allmählich, so dass die gesammte inducirende Wirkung des Eisenstabes in der anderen Rolle ganz wenig das Uebergewicht hat, so weicht beim Oeffnen des inducirenden Stromes die Nadel des mit den Inductionsrollen verbundenen Galvanometers doch erst ein wenig im Sinne des den Eisendrähten entsprechenden Inductionsstromes und dann erst nach der entgegengesetzten Seite aus. Dies ist ein klarer Beweis, dass die in der Zeiteinheit bewegte Elektricitätsmenge, welche die Nadel ablenkt, anfangs in der die Drahtbündel enthaltenden Rolle bedeutender ist, als in der den massiven Kern enthaltenden, obgleich die in der ganzen Zeit der Induction in Bewegung gesetzte Elektricitätsmenge in letzterer überwiegt. — Je grösser die Intensität des inducirenden Stromes ist, desto mehr überwiegt der Inductionsstrom der Eisenbündel in den ersten Momenten. In diesem Falle übertrifft nämlich die Wirkung des Verschwindens des Magnetismus im massiven Eisenkern die Wirkung desselben in den Drahtbündeln erst, wenn schon die Nadel des Galvanometers in Folge der dichteren Ströme ziemlich weit aus ihrer Ruhelage abgelenkt ist. Bei ihrer geneigten Lage gegen die Windungen des Multiplicators kann dann jene überwiegende Wirkung sie nicht mehr

nach der entgegengesetzten Seite ablenken. In Folge dieses secundären Umstandes müssen bei stärkeren Strömen zur Compensation der galvanometrischen Wirkung eines Eisenkernes weniger Eisendrähte verwendet werden, als bei schwächeren.

Analoge Erscheinungen ergeben sich, nach Dove, wenn gleich dicke und gleich lange Stücke von Flintenläufen, von denen das eine der Länge nach aufgeschnitten, das andere geschlossen ist, in die beiden Rollen des Differentialinductors eingelegt werden. Die galvanometrischen Wirkungen der Inductionsströme beider Rollen compensiren sich vollständig, und doch überwiegt die physiologische Wirkung der den aufgeschnittenen Lauf enthaltenden Rolle. 305

Werden in die beiden primären Spiralen des Differentialinductors die beiden gleichen Schenkel eines weichen Hufeisens eingeschoben und die Inductionsspiralen so gestellt, dass ihre entgegengesetzt gerichteten Ströme keine physiologische Wirkung hervorbringen, so bleibt dieses Verhältniss bestehen, wenn man zwischen die primäre und die Inductionsspirale der einen Rolle eine der Länge nach aufgeschnittene, zwischen die Spiralen der anderen Rolle eine gleiche, aber in sich geschlossene dünne Eisenblechröhre einschiebt. In beiden Fällen dienen die Blechröhren als Anker zu den Schenkeln des Magnetes und werden im entgegengesetzten Sinne, wie diese, magnetisirt. Beim Oeffnen des primären Stromes subtrahirt sich also ihre inducirende Wirkung von der der Schenkel des Hufeisens; indess überwiegt doch die Wirkung der letzteren, da ihre Magnetisirung bedeutender ist. Da sie auch im Verhältniss zu den Blechröhren eine sehr bedeutende Masse besitzen, so kommen die Unterschiede, welche bei ihnen durch das Aufschlitzen der einen auftreten, weniger in Betracht[1]).

Ebenso lassen sich alle §. 295 beschriebenen Versuche mit dem Differentialinductor anstellen, wenn man in seine beiden Spiralen die zu vergleichenden Eisenkerne, Blechcylinder u. s. f. einlegt und die physiologischen und galvanometrischen Wirkungen jeder Inductionsspirale einzeln untersucht.

Ganz dieselben Resultate, wie für die physiologischen Wirkungen, ergeben sich, wenn man den Strom des Differentialinductors durch eine kleine Drahtspirale leitet, in welche man Stahlnadeln einlegt. Ihre Magnetisirung findet immer im Sinne des Stromes der Rolle statt, deren Wirkung auch in physiologischer Beziehung überwiegt. 306

Dove (l. c.) verband z. B. die freien Enden der beiden entgegengesetzt verbundenen Spiralen seines Differentialinductors mit einem aus 200 Windungen von übersponnenem Kupferdraht bestehenden Multiplicator. Nachdem der Kreis des inducirenden Stromes geschlossen

[1]) Dove, Pogg. Ann. 43, p. 518, 1838*.

war, wurde in die eine Spirale ein Cylinder von weichem Eisen, in die andere ein Bündel von Eisendraht, in den Multiplicator eine dicke Nähnadel eingelegt. Beim Oeffnen der inducirenden Spiralen des Differentialinductors wurde die Nähnadel magnetisch. Um ihr hierbei den Magnetismus zu ertheilen, welchen sie durch die das Drahtbündel enthaltende Spirale erhielt, musste dasselbe aus wenigstens 70 Eisendrähten bestehen, während mehr als 110 Drähte erforderlich waren, um die galvanometrische Gleichheit der in beiden Inductionsspiralen inducirten Ströme herzustellen. Dieselben Verhältnisse zeigten sich, als in die beiden Drahtspiralen *A* und *B* gleich viel Eisendrähte eingelegt wurden, die Drähte der einen Rolle *B* aber mit einem in sich geschlossenen Metallblech umgeben waren. Bei vollkommener Compensation der Wirkungen der Inductionsströme am Galvanometer überwog die magnetisirende Wirkung der Rolle *A*.

Anders verhält es sich, wenn man die Enden der Inductionsspiralen des Differentialinductors mit den Drahtwindungen eines Elektromagnetes von weichem Eisen verbindet und die Richtung seiner Magnetisirung durch die Ablenkung einer ihm gegenübergestellten Magnetnadel bestimmt. Hat man die Rollen des Inductors mit einem massiven Eisencylinder (in *A*) und Drahtbündeln (in *B*) erfüllt, so dass beim Oeffnen des primären Stromes die Magnetisirung einer Stahlnadel durch den Inductionsstrom beider Rollen schon im Sinne des Stromes in Rolle *B* erfolgt, so wird doch der mit den Inductionsspiralen verbundene Elektromagnet im Sinne des Stromes in Rolle *A* magnetisirt.

Der Grund dieses verschiedenen Verhaltens des Stahles und Eisens kann folgender sein. Im ersten Moment nach dem Oeffnen überwiegt der schneller verlaufende, also in jedem einzelnen Zeittheil seiner Dauer dichtere Strom der Rolle *B*. Eine Stahlnadel erhält eine permanente Magnetisirung im Sinne dieses Stromes. Im späteren Verlaufe der Inductionsströme ist der Strom von *B* schon erloschen, während der von *A* noch andauert. Indess ist seine Intensität dann nicht mehr gross genug, um den permanenten Magnetismus des Stahles umzukehren; er vermindert ihn nur. Beim Eisen wird dagegen die Magnetisirung leichter durch einen dem ursprünglich magnetisirenden Strom entgegengerichteten Strom umgekehrt, so dass dann die in den letzten Zeittheilen der ganzen Induction noch vorhandenen Antheile des Stromes von *A* die anfängliche Magnetisirung des weichen Hufeisens durch den Strom von *B* umkehren können.

307 Diese Untersuchung der magnetisirenden Wirkung der Ströme des Differentialinductors bietet nach Dove[1]) ein bequemes Mittel dar, sehr geringe Spuren von Magnetismus in verschiedenen Metallen zu entdecken. Man legt in die eine Rolle *A* einen massiven Cylinder von dem zu

[1]) Dove, Pogg. Ann. **54**, p. 333, 1841*.

untersuchenden Metall und lässt die andere Rolle B leer. Die Magnetisirung der Stahlnadeln erfolgt in dem Sinne des Inductionsstromes der Rolle B, da die Inductionsströme in A verzögert werden. — Vertheilt man den massiven Metallcylinder in immer dünnere Drähte, so dass die Inductionsströme darin immer schwächer werden, und tritt endlich ein Punkt ein, bei dem die magnetisirende Wirkung des Stromes von Rolle A überwiegt, so verhält sich das Metall in derselben wie ein in A eingelegter Eisendraht; es ist also magnetisch.

Dieses Verhalten zeigte sich bei Kupfer, Zinn, Quecksilber (in Glasröhren), Antimon, Wismuth (schwach eisenhaltig), chemisch reinem Zink (schwach), Blei, Neusilber. — Wahrscheinlich enthielten alle diese Metalle geringe Beimengungen von Eisen.

Zugleich giebt auch der Differentialinductor eine Möglichkeit, das magnetische Moment verschiedener Substanzen zu vergleichen, indem man sie in die eine Rolle A desselben, in die andere Rolle B Eisendrähte einlegt, bis die entgegengesetzt gerichteten Inductionsströme beider Rollen die Nadel des Galvanometers nicht ablenken. Dann ist das Moment jener Substanzen dem der Drahtbündel gleich. Auf diese Weise waren bei Anwendung verschiedener Kerne in Rolle A folgende Zahlen n von Eisendrähten zur Compensation erforderlich:

	n
Röhre von doppeltem Eisenblech	170
Weicher Stahlcylinder	150
Quadratische Nickelstange (4‴75 in Quadrat)	10
Röhre von Nickel	4
Cylinder von Eisenscheiben mit zwischengelegtem Papier	4
Cylinder von Stahlscheiben mit zwischengelegtem Papier	2
Cylinder von Weissblechscheiben	1
Röhre von Neusilber	1
Cylinder von eisernen Bohrspänen	1

Legt man in die Rollen A und B des Differentialinductors einen weichen Eisen- oder Stahlstab und einen harten Stahlstab ein, verbindet die Enden der Inductionsrollen einerseits mit einander, andererseits in entgegengesetztem Sinne mit einem Galvanometer und schliesst den primären Strom, so schlägt die Nadel in Folge des Ueberwiegens der Inductionswirkung des Eisens im Sinne des Inductionsstromes in A aus, da Eisen und weicher Stahl mehr temporären Magnetismus annehmen, als harter Stahl. Legt man aber nach dem Oeffnen den harten Stahlstab umgekehrt in die Rolle B ein, so überwiegt bei neuer Schliessung der Strom in B, da nun der Stab sich nicht nur von Neuem in entgegengesetztem Sinne temporär magnetisirt, sondern auch noch seinen früheren permanenten Magnetismus verloren hat, also die Gesammtänderung seines magnetischen Momentes bedeutender ist, als beim weichen Eisen.

308 Was von der physiologischen und magnetisirenden Wirkung der mit verschiedenen Eisenkernen erfüllten Inductionsspiralen gesagt ist, gilt auch von der Funkenbildung. Selbst wenn beim Einlegen zweier Kerne in die beiden Spiralen des Differentialinductors die in beiden inducirten Ströme galvanometrisch ganz gleich sind, so ist doch, wenn man den primären Strom durch jede einzelne Rolle desselben leitet und sodann öffnet, der entstehende Oeffnungsfunken heller bei der Rolle, deren Inductionsspirale die grössere magnetisirende oder physiologische Wirkung ausübt.

Sehr deutlich lässt sich nach Poggendorff[1]) diese Wirkung der Extraströme auf die Funkenentladung bei verschiedenen Drahtleitungen und Eisenkernen an einem Wagner'schen Hammer studiren, welchen man unter der evacuirten Glocke der Luftpumpe spielen lässt, indem man gleichzeitig in den Schliessungskreis der ihn erregenden Säule eine aus zwei neben einander gewickelten Drahtlagen bestehende Spirale einfügt. Sind die beiden Drahtlagen so verbunden, dass sie der Strom in entgegengesetzter Richtung durchfliesst, so entsteht in ihnen kein Extrastrom beim Oeffnen und Schliessen des Stromkreises durch den Wagner'schen Hammer; der Funken an der Unterbrechungsstelle des letzteren ist klein und unscheinbar. Durchfliesst der Strom die Drahtlagen aber in gleicher Richtung, so wird der Funken sehr lebhaft, und zugleich überzieht blaues Glimmlicht den negativen Theil an der Unterbrechungsstelle. Diese Erscheinung zeigt sich namentlich sehr deutlich, wenn man ein volles oder hohles Bündel von Eisendrähten in die Spirale einschiebt, und besonders wenn dasselbe ziemlich viel länger ist als die Spirale, so dass der in ihm entwickelte Magnetismus sehr bedeutend ist. — Legt man statt des Drahtbündels einen massiven Eisenstab in die Spirale, so vermindert sich dagegen die Lichterscheinung, da die in ihm inducirten Ströme auf die Spirale selbst inducirend zurückwirken, und so die Intensität der in ihr erzeugten Extraströme in jedem einzelnen Moment mehr vermindert wird, als der im Stabe erzeugte Magnetismus sie vermehrt. — In gleicher Weise vermindert eine um die Spirale gelegte zweite, in sich geschlossene Spirale die Helligkeit der Funken, während dies nicht der Fall ist, wenn ihr Kreis an irgend einer Stelle unterbrochen ist.

Endlich ist auch, ganz analog den Erfahrungen des §. 165, die Wärmewirkung der Inductionsströme grösser, wenn die in die inducirenden Spiralen eingelegten Eisenkerne keine Bildung von Inductionsströmen in ihrer Masse zulassen; also grösser beim Einlegen von Drahtbündeln als beim Einlegen von hohlen Röhren u. s. f.[2]).

309 Die vorhergehenden Versuche haben auf indirectem Wege den Einfluss der Inductionsströme auf den zeitlichen Verlauf der Magnetisi-

---

[1]) Poggendorff, Pogg. Ann. 95, p. 159, 1855*. — [2]) Vergl. auch Wartmann, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 19, p. 257, 1847*.

rung und Entmagnetisirung des Eisens dargethan. Directer zeigen die folgenden Erfahrungen, wie die Verminderung der Intensität der Ströme, welche in den Eisenkernen oder in den dieselben umgebenden Spiralen inducirt werden, die Schnelligkeit der Aenderungen des Magnetismus bei Veränderung der Intensität des magnetisirenden Stromes vermehrt.

Leitet man den Strom eines Elementes von grosser Oberfläche durch einen Wagner'schen Hammerapparat oder den Zeichengeber eines Morse'schen Telegraphen, so kann man in derselben Zeit viel weniger Oscillationen des Hammers des ersteren, viel weniger Zeichen am zweiten erhalten, als bei Anwendung einer Anzahl hinter einander verbundener kleiner Elemente; selbst wenn in beiden Fällen die Intensität des Stromes während seines continuirlichen Verlaufes dieselbe ist[1]).

In gleicher Weise geht der Ton des sich bewegenden Hammers des Wagner'schen Apparates in die Höhe, wenn man statt eines Grove'schen Elementes deren sechs hinter einander verbundene zur Bewegung desselben verwendet, dabei aber durch Einschaltung von Widerständen in den Schliessungskreis die Stromintensität constant erhält[2]).

Bei gleicher Intensität des magnetisirenden Stromes ist die elektromotorische Kraft des Extrastromes in der Magnetisirungsspirale des den Wagner'schen Hammer oder den Schreibstift des Morse'schen Telegraphen bewegenden Magnets beim Schliessen des Stromkreises zwar jedesmal dieselbe; da indess bei Anwendung mehrerer hinter einander geschlossener Elemente der Widerstand der Schliessung grösser ist, als bei einem grossen Element, so wird seine Intensität und die durch ihn bewirkte Schwächung des Hauptstromes geringer. Der Magnet erhält also bei Anwendung einer vielgliedrigen Säule ein gewisses, zur Bewegung des Schreibstiftes oder Hammers erforderliches Quantum von Magnetismus in kürzerer Zeit, als bei nur einem Element. — Der beim Oeffnen der Schliessung erzeugte Extrastrom kommt hier nicht in Betracht, da die Leitung bei seiner Ausbreitung unterbrochen ist.

310 Die verschiedene Verminderung der Intensität des magnetisirenden Stromes durch den Extrastrom hat Beetz l. c. auch durch einen messenden Versuch gezeigt. Er leitete den Strom eines Grove'schen Elementes oder einer aus sechs solchen Elementen zusammengesetzten Säule durch eine kurze Spirale von 0,5 mm dickem Kupferdraht und schaltete in jedem Falle in den Schliessungskreis einen solchen Widerstand ein, dass die an einem Spiegelgalvanometer gemessene Intensität bei ununterbrochener Schliessung die gleiche war. Wurde nun der Strom oftmals durch ein mittelst eines Uhrwerks getriebenes Zahnrad (200 mal in der Secunde) unter-

[1]) Hipp, Mitth. d. naturf. Gesellsch. in Bern, 1855, p. 190*; vergl. auch Schneebeli, Pogg. Ann. 155, p. 156, 615, 1875*. — [2]) Beetz, Pogg. Ann. 102, p. 557, 1857*.

brochen, so subtrahirte sich der Extrastrom von dem magnetisirenden Strom, und die Intensität desselben war am Galvanometer (in Scalentheilen):

	1 Element	6 Elemente
Spirale ohne Eisenkern	6,2	7,5
Spirale mit Eisenkern	2,5	5,8

Bei Vermehrung der Zahl n der Unterbrechungen wächst der Einfluss der Extraströme, so dass Beetz dann folgende Ablenkungen am Galvanometer erhielt:

	1 Element		6 Elemente	
	$n = 170$	$n = 250$	$n = 170$	$n = 250$
Spirale ohne Eisenkern	2,5	2	3,4	3
Spirale mit Eisenkern	1,2	0,5	2,6	2,4

311 Eine genauere quantitative Untersuchung der Zeit, welche der temporäre Magnetismus eines Elektromagnetes bei verschieden langen Schliessungskreisen braucht, um bis zu einer gewissen Grösse anzusteigen, ist von Beetz (l. c.) vorgenommen worden.

Die Schenkel eines Elektromagnets E, Fig. 73, wurden mit zwei Drahtspiralen bedeckt, von denen die eine M als Magnetisirungs-, die

Fig. 73.

andere J als Inductionsspirale diente. Auf die Axe einer Centrifugalmaschine wurde ein aus zwei Elfenbeincylindern A und B bestehender Commutator gesteckt. Auf die Elfenbeincylinder waren oben und unten Messingplatten geschraubt, von denen schmale Fortsätze in die freie Elfenbeinfläche hineinragten. Eine an dem einen Theile A unterhalb angebrachte Gradtheilung, welcher ein Strich auf der oberen Seite von B entsprach, gestattete, die Cylinder um ein Bestimmtes gegen einander zu drehen. Auf A und B schleiften je zwei Federn, a, b und c, d, von denen a und b den aus einem oder mehreren Elementen S und der Spirale M bestehenden Schliessungskreis, c und d den die Inductionsspirale J und das Galvanometer G enthaltenden Kreis schlossen, wenn sie gleich-

zeitig auf die Messingplatten und die von diesen ausgehenden Metallfortsätze auf den Elfenbeincylindern traten. Stellt man die Cylinder *A* und *B* so gegen einander, dass die Federn *cd* bei der Drehung von *A* und *B* um ein Bestimmtes später auf die Metallfortsätze von *A* treten, als die Federn *a* und *b* auf die Fortsätze von *B*, so wird der Stromkreis *JGdc* etwas später geschlossen, als der Kreis *SabM*, und der Ausschlag des Galvanometers giebt die Intensität des Inductionsstromes einige Zeit nach der Schliessung des primären Stromes während der Zeit an, dass Feder *c* auf dem Metallfortsatz von *A* schleift. — Damit indess beim Weiterdrehen nicht der Stromkreis durch Abgleiten der Feder *b* von dem Metallfortsatz von *B* wiederum geöffnet werde, wodurch in *J* ein neuer Strom inducirt würde, bringt Beetz unter dem, die Spirale *M* tragenden Schenkel des Magnetes einen Hebel an, welcher einerseits den Eisenanker *e*, andererseits die Drähte *f* und *g* trägt, von denen *f* beständig in Quecksilbernapf *k* taucht, *g* dicht über dem Quecksilber des Napfes *l* schwebt. *k* und *l* sind mit den Punkten *m* und *n* der Stromesleitung der Säule metallisch verbunden. Sobald beim Drehen des Cylinders *B* der Strom von *S* geschlossen wird, wird Anker *e* vom Magnet angezogen, *g* taucht in das Quecksilber von *l* ein, und der Stromkreis der Magnetisirungsspirale bleibt auch, wenn bei der weiteren Drehung des Commutators die Feder *b* wieder auf Elfenbein übertritt, auf der Bahn *MSnkfglmM* geschlossen. — Kennt man die Anzahl Grade, um die der Cylinder *B* gegen Cylinder *A* verstellt ist, sowie die Umdrehungsgeschwindigkeit der Cylinder, welche durch den Ton einer an dem Rande eines auf die Drehungsaxe aufgesetzten Zahnrades schleifenden Feder bestimmt wird, so weiss man, um welche Zeit *t* der Inductionskreis später als der primäre, magnetisirende Kreis geschlossen ist. — Wurden in den Inductionskreis verschiedene Längen *l* von Draht (in Viertelstunden Telegraphendraht) eingeschaltet, so ergab sich die Intensität *i* des Inductionsstromes:

t	$l = 0$	1	2	3	10
0 Sec.	$i =$ 32,5	8,1	5	2,2	0,6
0,0035	8,2	2,2	1,2	0,8	0,3
0,0069	4,0	0,8	0,7	0,6	0,2
0,0208	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1

Je grösser also der Widerstand des inducirten Kreises ist, desto schneller sinkt die Intensität des Inductionsstromes auf einen bestimmten kleinen Werth. Bildet sich derselbe als Extrastrom in der primären Schliessung selbst, so wächst demnach die Intensität des primären Stromes um so schneller bis zu einem gewissen Theil ihres Maximums an, je grösser der Widerstand seiner Schliessung ist.

312 Auch bei Anwendung verschiedener Eisenkerne hat Beetz durch quantitative Messungen den verschieden schnellen Verlauf der Inductions-

ströme näher verfolgt, welcher durch die schon erwähnten Versuche auf indirectem Wege dargethan worden ist [1]). Der Strom einer Säule *S*, Fig. 74 und 75, wurde vermittelst einer Poggendorff'schen Wippe *W* (ver-

Fig. 74.

Fig. 75.

gleiche Bd. II, §. 716) durch einen Rheostat R_1 geleitet und theilte sich bei *a* und *b* in zwei Zweige. Der eine derselben enthielt einen Rheostat R_2, der andere eine in der Ostwestrichtung liegende Magnetisirungsspirale *M*, die Tangentenbussole *T* und eine Vorrichtung *V*, durch welche

---

[1]) Beetz, Pogg. Ann. 105, p. 497, 1858*.

in einem bestimmten Augenblicke der Strom unterbrochen werden konnte. Dieselbe bestand aus einem kleinen Elektromagnet *m*, welcher durch den Strom einer besonderen Säule *s* in jenem Augenblicke erregt wurde und dann den Anker *q* anzog, welcher an der, um die Axe *r* drehbaren Metallfeder *rl* befestigt war. Die Axe *r* war mit dem einen Ende der, durch die Spirale *M* gehenden Leitung der Säule *S* verbunden; zwei dem Ende *l* der Feder *rl* gegenüber stehende Metallspitzen *f* und *g* konnten durch den Commutator *c* abwechselnd mit dem anderen Ende derselben verbunden werden. Geschah dies bei Spitze *g*, gegen welche die Feder *rl* in ihrer Ruhelage gegendrückte, so wurde bei der Erregung des Magnetes *m* der Stromkreis *SaTVMb* der Säule durch Anziehung des Ankers *q* geöffnet; geschah dies bei der Spitze *f*, so wurde dabei *rl* gegen *f* gegengedrückt, und der Stromkreis geschlossen. — Die Säule *s* konnte durch eine Wippe *w* mit dem Commutator *P* verbunden werden, dessen Einrichtung ganz analog der des in §. 311 beschriebenen ist. Auf eine Metallaxe sind zwei Elfenbeincylinder α und β geschoben, die beide an ihrem äusseren Ende mit metallenen Ringen eingefasst sind, von denen schmale metallene Fortsätze auf das Elfenbein übergreifen. Die Breite dieser Fortsätze beträgt bei α 5^0, bei β 10^0. Der Metallring von β ist mit der Axe verbunden. Gegen diese, sowie gegen β schleifen die Federn 1 und 2, gegen α die Federn 3 und 4. Die Federn 1 und 2 sind durch die Wippe *w* mit der Säule *s* verbunden. Die Federn 3 und 4 stellen die Verbindung einer schmalen, auf die Magnetisirungsspirale *M* aufgeschobenen Inductionsspirale *I* mit dem Spiegelgalvanometer *G* her, sobald Feder 4 auf den Metallfortsatz des Elfenbeincylinders α auftritt. Die den Commutator *P* tragende Axe wird vermittelst einer Centrifugalmaschine in Rotation versetzt, und ihre Geschwindigkeit durch den Ton der Feder *z* bestimmt, welche gegen das auf die Axe aufgesetzte Zahnrad *x* gegenschlägt.

Der Gang der Versuche war wesentlich folgender: Zuerst wurde durch Einstellung der Rheostaten R_1 und R_2 bewirkt, dass die an der Tangentenbussole *T* abgelesene Intensität *I* des magnetisirenden Stromes einen bestimmten Werth hatte. — Da sich aber beim Oeffnen und Schliessen des Stromes in der Spirale *M* ein Extrastrom bildet, welcher sich zu ihm addirt oder von ihm subtrahirt, so mussten, damit die Intensität desselben jenem Strome proportional blieb, bei der Regulirung der Intensität *I* durch die Rheostaten R_1 und R_2 die Widerstände der Zweige aR_2b und aR_1b (Fig. 74) in entgegengesetztem Sinne gleichmässig geändert werden, damit der Gesammtwiderstand dieser neben einander vom Extrastrom durchflossenen Leiter unverändert blieb. — Um dies zu prüfen, wurden vor jedem Versuche vermittelst der Wippe *W* (sie wird so umgeschlagen, dass ihre in der Figur oberhalb gezeichneten Haken in die unter ihnen befindlichen Löcher tauchen) die zwei Elemente der Säule *S* gegen einander verbunden, dass ihr Strom sich aufhob, und in den Zweig *aTVMb* ein besonderes Element *K* eingeschaltet. Der Ausschlag der

Bussole T musste dann in allen Fällen constant sein. So lange die Säule S nicht durch den Apparat V geschlossen war, wurde sie vermittelst der zweiten Wippe w mit dem Drahte v verbunden, dessen Widerstand dem ihrer nachherigen Schliessung nahezu gleich war. Dadurch wurden die durch die Polarisation verursachten Schwankungen ihrer elektromotorischen Kraft vermieden.

Die beiden Hälften α und β des Commutators P wurden nun um einen an der Theilung genau messbaren Winkel gegen einander gedreht. Darauf wurde durch Umschlagen der Wippe w die Verbindung von S mit v aufgehoben und die Schliessung des die Säule S enthaltenden Kreises durch Zurückschlagen der Wippe W (so dass die unterhalb gezeichneten Haken derselben in die unter ihnen befindlichen Löcher tauchen), hergestellt. Dann wurde der Commutator P in Rotation versetzt. Dadurch wurde der die Säule s und die Magnetisirungsspirale des Elektromagnetes m enthaltende Schliessungskreis geschlossen, sobald Feder 2 auf den Metallfortsatz des Elfenbeincylinders β trat. Magnet m wurde erregt, zog Anker q an und öffnete oder schloss je nach der Stellung des Commutators c den die Magnetisirungsspirale M durchfliessenden Strom der primären Säule S. Bei weiterer Drehung des Commutators P wurde auch die Inductionsspirale I durch die Federn 3 und 4 mit dem Galvanometer G verbunden. Die Zeit zwischen der Schliessung der Stromkreise der Säule s und der Spirale I ergab sich aus der Drehungsgeschwindigkeit von P und der Stellung der Elfenbeincylinder α und β. Sie wurde um je 0,00195 Secunde verlängert, wenn dieselben um 5^0 weiter gegen einander verschoben wurden. — Da indess der Magnet m eine gewisse Zeit brauchte, um seinen Magnetismus so viel zu ändern, dass sich der Anker q bewegte und den Stromkreis der Säule s öffnete oder schloss, so musste diejenige Stellung der Scheiben α und β des Commutators P als Nullstellung betrachtet werden, bei welcher bei obigem Verfahren eben ein Inductionsstrom auftrat. — In Folge der Breite des Metallfortsatzes auf α vermittelten die Federn 3 und 4 den Durchgang des Inductionsstromes für etwa 0,00195 Secunden. Da der Fortsatz auf β breiter war, als der auf α, so konnte bewirkt werden, dass die Feder 2 auf den Fortsatz auf β eher auftrat oder später von demselben abglitt, als Feder 4 auf den Fortsatz auf α. So konnte mit Sicherheit verhütet werden, dass nicht etwa zugleich ein in I erregter Schliessungs- und Oeffnungsinductionsstrom zum Galvanometer gelangte.

313 Die Versuche wurden zuerst angestellt, ohne dass in der Spirale M ein Eisenkern lag, sodann nach dem Einlegen eines solchen. Das jedesmalige magnetische Moment der Spirale mit oder ohne Eisenkern wurde durch die Ablenkung einer ihrem Ende gegenüber gestellten Magnetnadel N bestimmt. Als Eisenkerne wurden benutzt:

1) ein massiver Eisencylinder;

2) ein Bündel von 1000 ausgeglühten Eisendrähten;

3) und 4) ein ganzer und ein der Länge nach aufgeschlitzter Flintenlauf;

5) ein Papierrohr mit Eisenfeilen, welche durch Glühen und Schütteln mit einer Harzlösung mit einer isolirenden Schicht überzogen waren;

6) ein Papierrohr mit runden Eisenblechscheiben. — Alle diese Kerne hatten 14,5 cm Länge und 24 mm Durchmesser;

7) und 8) Eisenstäbe von 14,5 cm Länge und 12 oder 2 mm Durchmesser;

9) Eisenstäbe von 29 cm Länge und 24 mm Durchmesser;

10) Eisendrahtbündel, 7 cm lang, 24 mm dick.

314 Ausser den in den einzelnen Zeiten nach dem Schliessen oder Oeffnen des primären Stromes in Spirale *I* inducirten „Partialströmen" wurde auch der totale inducirte Strom oder „Integralstrom" gemessen, welcher erhalten wurde, während die Federn beständig auf den Metallstücken des nunmehr ruhenden Commutators *P* auflagen und der magnetisirende Strom geöffnet oder geschlossen wurde. Bei der Vergleichung der verschiedenen Eisenkerne wurde die Intensität des magnetisirenden Stromes so gewählt, dass diese Integralströme möglichst gleich waren, die Kerne also gleiche magnetische Momente nach längerer Schliessung erhielten. Die Differenzen der in den einzelnen Zeiten bei den Versuchsreihen inducirten Partialströme mit und ohne Einlage der Eisenkerne in die Magnetisirungsspirale geben ein Maass für die Veränderung ihres Magnetismus in diesen Zeiten. Beim Schliessen des magnetisirenden Stromes entspricht also ihre von Anfang der Magnetisirung bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gezählte Summe dem magnetischen Moment des Eisenkernes zu demselben Zeitpunkte; beim Oeffnen des Stromes entspricht die Differenz des beim völligen Verschwinden des Magnetismus inducirten Integralstromes und der Summe der vom Zeitpunkt des Oeffnens an bis zu einer bestimmten Zeit gezählten Partialströme dem magnetischen Moment in jener Zeit. Es ergaben sich folgende Resultate:

1) Der ohne Einlegen eines Eisenkernes in die Spirale *M* in der umgebenden Inductionsspirale bei der Oeffnung des primären Stromes erhaltene Inductionsstrom dauert unmessbar kurze Zeit, wie dies schon Helmholtz (§. 54) gefunden. Er zeigt gleiche Intensität, mag die Feder 4 auf dem unter ihr befindlichen Metallfortsatz nach dem Oeffnen des primären Stromes 1^0 oder 5^0 durchlaufen.

2) Der beim Schliessen inducirte Strom steigt in 10 bis 12 Tausendstel Secunden bis zu einem Maximum an und fällt dann, namentlich bei einer längeren Spirale mit vielen Windungen, langsam ab. — Der beim Oeffnen oder Schliessen erhaltene Integralstrom ist indess unter gleichen Umständen in beiden Fällen gleich, wie auch die Versuche von Edlund (§. 53) und Rijke (§. 54) für die Extraströme ergeben.

3) Legt man verschiedene Eisenkerne in die Spirale, welche ganz in sie hineinpassen, so ist das Ansteigen der bei der Schliessung inducir-

ten Partialströme und des Magnetismus der Kerne fast dasselbe in allen Fällen. Die Curven I*a* und *b*, Fig. 76, stellen auf diese Weise den Magnetismus eines massiven Eisenkernes und Drahtbündels dar. Die Abscissen bezeichnen die Zeiten von Anfang der Schliessung an, die Ordinaten die am Ende derselben sich ergebenden magnetischen Momente der Eisenkerne. Der Verlauf des Ansteigens ist also im Wesentlichen durch den in der Magnetisirungsspirale inducirten Gegenstrom, viel weniger durch die in der Masse der Eisenkerne selbst inducirten Ströme oder die zur magnetischen Einstellung ihrer Molecüle erforderliche Zeit bedingt.

Fig. 76.

4) Beim Oeffnen fällt der Magnetismus der Kerne verschieden schnell ab, wie auch Dove angegeben hat. — Drahtbündel und Röhren voll Eisenfeilen verlieren fast augenblicklich, ein aufgeschlitzter Flintenlauf (*a*), in dessen Masse sich nur schwache Inductionsströme bilden können, ziemlich schnell, eine Papierröhre voll Blechscheiben (*b*) langsamer, und ein in sich geschlossener Flintenlauf (*c*) oder massive Eisenkerne (*d*) noch langsamer ihren Magnetismus. Die Curven II*a* bis *d*, Fig. 76, verzeichnen die magnetischen Momente dieser Kerne zu verschiedenen Zeiten nach Oeffnung des magnetisirenden Stromes.

5) Wurde die schmale Inductionsspirale *I* über verschiedene Stellen eines ganz in die Magnetisirungsspirale hineinpassenden, aus einzelnen Blechscheiben gebildeten Kernes geschoben, so war trotz des Mangels an Continuität im Kern die Zeit zum Entstehen des Magnetismus an der Mitte und am Ende gleich [1]).

315 Zur Demonstration des zeitlichen Verlaufes der in einer Spirale mit oder ohne Einsenkern inducirten Ströme bedient sich A. von Ettingshausen [2]) eines Stimmgabelapparates. In den Schliessungskreis des Stromes einer selbstthätigen elektromagnetischen Stimmgabel ist eine

[1]) Bei verschiedenen Kernen von weichem Eisen, schmiedbarem Gusseisen und Stahl fand Deprez (Compt. rend. **80**, p. 1353, 1876*) nahe die gleiche Zeit für die Entmagnetisirung und die Magnetisirung, nämlich für erstere 0,00025, für letztere 0,00150 Secunde, bei grauem Gusseisen war die letztere Zeit etwa nur 0,001 Secunde. Die Kerne waren 2 mm dick und 13 mm lang und lagen in Spiralen von 14 m Drahtlänge (Draht von $^1/_5$ mm Dicke). — [2]) A. von Ettingshausen, Pogg. Ann. **159**, p. 51, 1876*.

inducirende Spirale eingeschaltet, während die Enden der Inductionsspirale mit einem Elektromagnet verbunden sind, der eine zweite stark magnetisirte, gleich gestimmte Stimmgabel antreibt. Beide Stimmgabeln sind mit ihren Schwingungsebenen auf einander senkrecht gestellt, ihre einen Zinken tragen kleine Spiegel, von denen ein durch eine Linse hergestelltes Bild einer kleinen runden Oeffnung reflectirt wird. Werden durch die Schwingungen der ersten Gabel die inducirenden Ströme geöffnet und geschlossen und erscheinen die inducirten um ein Bestimmtes gegen erstere verzögert, so kann man dies an der Lage der elliptischen Schwingungscurve bestimmen. Schiebt man in die inducirende Spirale einen Eisenkern, so geht die Ellipse durch eine gerade Linie allmählich in eine zweite Ellipse über.

Legt man an die Ellipse Tangenten in der Richtung der einzeln beobachteten Schwingungen, welche ein Rechteck $ABCD$ bilden, und sind die den Tangenten AB und CD resp. BC und AD parallelen Durchmesser der Ellipse gleich a und b, ist die Schwingungsdauer T, so ist die Phasendifferenz D gegeben durch die Formel

$$\pm \sin \frac{2\pi D}{T} = \frac{a}{AB} = \frac{b}{AD}.$$

Durch derartige Versuche ergiebt sich die Verzögerung der Induction durch Eisenstäbe, welche in die inducirende Spirale gelegt werden, namentlich wenn sie auf beiden Seiten aus derselben hinausragen; Bündel von 7 je 4 mm dicken Eisendrähten verzögern etwa ebenso stark, wie die massiven Kerne, aufgeschnittene Röhren verzögern weniger, als geschlossene, Röhren mit Eisenfeilen noch weniger, Kupferstäbe gar nicht. Die Versuche stimmen im Wesentlichen mit den von Beetz erhaltenen Resultaten.

316 Wir haben schon §. 124 die Formel für die Veränderungen der Stromintensität in einer Spirale berechnet, in welcher ein Eisenkern liegt und in der nach dem Schliessen des Stromes sowohl durch die Aenderung der Stromintensität selbst, wie auch durch die Aenderung des Momentes des Magnetes Extraströme inducirt werden.

Ist I die Stromintensität zur Zeit t, m das durch dieselbe erzeugte Moment des Magnetes, P das Potential der Spirale auf sich selbst, p das Potential des Magnetes (vom Magnetismus Eins) auf die Spirale, W der Widerstand des Kreises, so ist

$$IW = E - P\frac{dI}{dt} - p\frac{dm}{dt}.$$

Nehmen wir an, dass das Moment des Magnetes der Stromintensität proportional ist, also $m = \alpha I$, so ist die Intensität:

$$IW = E - (P + \alpha p)\frac{dI}{dt}$$

und

$$I = \frac{E}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{P + ap}t}\right).$$

Ist die endliche Intensität für $t = \infty$ gleich $E/W = I_0$, ist das endliche Moment des Magnetes $M_0 = \alpha I_0$, so folgt:

$$m = M_0\left(1 - e^{-\frac{W}{P + ap}t}\right) = \alpha I_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\beta}}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{A)}$$

wo β eine zweite Constante ist.

Wird nach voller Entwickelung des Magnetismus die Säule aus der Schliessung ausgeschaltet, dafür aber ein ihr an Widerstand gleicher Draht eingefügt, so erhalten wir ganz analog wie in §. 122 das Moment des Magnetes zur Zeit t nach der Umschaltung

$$m_0 = M_0 e^{-\frac{W}{P + pa}t} = \alpha I_0 e^{-\frac{t}{\beta}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{B)}$$

Das Moment des Magnets nimmt nach dem Schliessen des magnetisirenden Stromes nach dem Gesetze einer logarithmischen Curve zu, nach dem Oeffnen nach demselben Gesetz ab.

317 Wird demnach vor einem in einer ostwestlich gerichteten Spirale liegenden Eisenkern eine Magnetnadel aufgestellt und durch die Spirale ein Strom geleitet, welcher durch einen Interruptor oft unterbrochen wird, so ist die Ablenkung um so kleiner, je öfter die Unterbrechungen geschehen, da dann der Magnetismus bei jeder Schliessung sich immer weniger vollständig entwickeln kann. Wird aber der Interruptor so eingerichtet, dass in dem Moment, wo die Metallfeder, welche die Verbindung der Magnetisirungsspirale mit der Säule vermittelt, von den Metalleinlagen des Interruptors abgeleitet, auf dieselben eine zweite Feder tritt, welche die Magnetisirungsspirale mit einer neuen Schliessung verbindet, deren Widerstand gleich dem der Säule ist, so findet die Abnahme nicht statt, indem nun der entsprechende Theil des Oeffnungsinductionsstromes hinzutritt. Dagegen ist wie im anderen Falle die Quantität der in der Säule zersetzten Stoffe in gleicher Weise vermindert, da auch hier der Oeffnungsextrastrom die Säule nicht durchfliesst. Indess darf doch die Drehung nicht allzu schnell erfolgen, denn sonst läuft auch der Oeffnungsextrastrom nicht vollständig ab.

318 Die Richtigkeit der im §. 316 für das Ansteigen der Magnetisirung eines weichen Eisenkernes mit der Zeit nach dem Schliessen des magnetisirenden Stromes gegebenen Formel hat Felici[1]) mittelst seines Interruptors geprüft.

Zwei gleiche inducirende und zwei gleiche, dieselben umgebende Inductionsspiralen waren je mit einander verbunden, der Stromkreis der ersteren wurde zu bestimmten Zeiten durch den Interruptor (§. 128) geschlossen und nach einer messbaren Zeit t der Inductionskreis geöffnet.

[1]) Felici, Nuovo Cimento, **12**, p. 130 u. f., 1874, **13**, p. 266, 1875*.

Die Verbindung war so hergestellt, dass ein in denselben eingeschlossenes Galvanometer keinen Ausschlag zeigte. Wurde nun in die eine Inductionsspirale ein weicher Eisenkern gefügt, so entsprach der Galvanometerausschlag der Summe der in der Zeit t durch den Eisenkern inducirten Ströme. Dieselbe lässt sich annähernd durch die Formel

$$A = c(1 - \alpha^{-bt})$$

darstellen, wo c, α und b Constante sind. Nur in den ersten Momenten ist das Anwachsen von A langsamer, als nach der Formel, offenbar in Folge der Rückwirkung der Inductionsströme auf die Magnetisirung des Eisens.

Besser entspricht den Versuchen eine Formel mit zwei Gliedern $a_1 \alpha^{-b_1 t}$ und $a_2 \alpha^{-b_2 t}$; namentlich bei Anwendung von massiven Eisen- und Stahlkernen. Auch beim Oeffnen ist der Gang der Entmagnetisirung durch eine analoge Formel

$$A_1 = a_1' \alpha^{-\beta_1 t} + a_2' \alpha^{-\beta_2 t}$$

ausgedrückt.

Auch wurde ein Strom durch eine Spirale geleitet, in welcher ein Eisenkern lag und dieselbe mit einer Inductionsspirale umgeben. Eine bestimmte Zeit t nach der Schliessung des Stromes in der magnetisirenden Spirale wurde die Inductionsspirale mit dem Galvanometer verbunden, dessen Ausschlag dem zur Zeit t noch im Eisenkern vorhandenen Moment entspricht. Als Eisenkerne dienten neun Stäbe von 0,115 m Länge und 0,007 m im Quadrat Querschnitt, welche an den Enden erhöhte Ränder hatten. Sie lagen in einer aufgeschlitzten Messingblechhülle. Wurde dieselbe mit Quecksilber gefüllt, so verlief die Induction langsamer in Folge der in der Masse desselben inducirten Ströme.

Bei anderen Versuchen leitete Felici (l. c.) mittelst seines Interruptors einen Strom durch eine 10 cm lange und 6 cm weite Spirale, in welcher ein Eisenkern lag, und durch ein Galvanometer, und öffnete den Strom nach einer bestimmten Zeit t. Er fand den der Stromintensität des magnetisirenden Stromes und dem Moment des Magnetes zu dieser Zeit proportionalen Ausschlag der Magnetnadel gegeben durch die Formel $F_1 = at - b(1 - \alpha^{-\lambda t})$, wenn a, b, α, λ Constante sind.

Versuche von Schneebeli[1]) bestätigen ebenfalls diese Formeln. Es wurde die Zeit von dem Oeffnen des einen Elektromagnet magnetisirenden Stromes bis zum Abfallen des Ankers bei verschiedener Belastung des letzteren durch ein Chronoskop bestimmt. — Wurden die Spiralen des Magnetes nach der Loslösung von der Säule statt in gleicher Richtung, entgegengesetzt mit einander verbunden, so dass sich die Inductionsströme in ihnen aufhoben, so fiel der Anker sehr viel schneller ab.

319 Bringt man eine kurze Magnetisirungsspirale auf eine Stelle eines langen Eisenkerns, eine kurze Inductionsspirale auf eine andere, so neh-

---

1) Schneebeli, Bullet. de la Soc. des Sc. Nat. de Neufchatel, 11, p. 63*; Beibl. 1, p. 635, 1877*.

men beim Oeffnen des Stromes in der Magnetisirungsspirale die Intensitäten der in der Inductionsspirale inducirten Ströme um so mehr ab, je weiter dieselbe von der Magnetisirungsspirale entfernt ist, auch abgesehen von der mit der Entfernung abnehmenden directen Inductionswirkung beider Spiralen auf einander. Wir haben schon Thl III, §. 601 erwähnt, dass dies auf der Abnahme der magnetischen Momente der einzelnen Theile des Eisenstabes von der direct magnetisirten Stelle aus beruht. Zugleich aber vergehen, wie Beetz[1]) bei seinen §. 312 erwähnten Versuchen vom Jahre 1858 gezeigt hat, nach dem Oeffnen des den einen Schenkel eines Elektromagnets magnetisirenden Stromes erst einige Momente, bis der entstehende Inductionsstrom das Verschwinden des Magnetismus im anderen Schenkel anzeigt; ebenso vergehen, wenn die Spiralen auf die beiden Enden eines 58 cm langen, 24 mm dicken Eisenstabes geschoben sind, wohl 8 Tausendstel Secunden nach der Schliessung des magnetisirenden Stromes, ehe der Inductionsstrom anzeigt, dass auch das der Magnetisirungsspirale ferner liegende Ende des Stabes Magnetismus annimmt. Die Curven III und IV, Fig. 76, p. 258 zeigen in diesen beiden Fällen das Verschwinden und Anwachsen des Magnetismus. Es vergeht also eine gewisse Zeit, bis die an einer Stelle eines Stabes erzeugten Veränderungen des magnetischen Momentes seiner Theilchen auch auf andere, in der Richtung seiner Axe ferner liegende Theilchen desselben sich ausdehnen.

Dies tritt noch weit mehr hervor, wenn die Continuität der Eisenmasse in der Richtung ihrer magnetischen Axe gestört ist, wenn also z. B. die Magnetisirungsspirale auf ein Drahtbündel geschoben ist, in welchem keine peripherischen Ströme inducirt werden, und welches beim Oeffnen des Stromes fast augenblicklich seinen Magnetismus verliert; die Inductionsspirale aber auf eine mit flachen Blechscheiben gefüllte Papierröhre geschoben ist, welche mit ihrer einen Endfläche gegen die Endfläche des Drahtbündels gegengelegt ist. Hier vergeht eine bedeutende Zeit nach Schliessung des Stromes, ehe der Inductionsstrom die Magnetisirung der Bleche anzeigt.

Legt man gegen das Ende des, mit der Magnetisirungsspirale umgebenen Drahtbündels aufgeschnittene oder ganze Flintenläufe oder Drahtbündel, und schiebt auf sie die Inductionsspirale, so ist auch zum Verschwinden des Magnetismus nach dem Oeffnen des Stromkreises der Magnetisirungsspirale eine geraume Zeit erforderlich. Bei den vollen und aufgeschnittenen Flintenläufen sind die Inductionswirkungen gleich; ein Beweis, dass die peripherisch in der Eisenmasse inducirten Ströme keinen Einfluss auf die Erscheinung haben; bei dem Drahtbündel, welches schwerer ist als die Flintenläufe, und in welchem mehr einzelne, neben einander liegende, magnetisirte Molecüle nach Aufhebung des magnetisirenden Stromes auf einander einwirken, verschwindet der Magne-

[1]) Dasselbe Resultat hat später Trève, Compt. rend. 77, p. 1296, 1873*, nochmals publicirt.

tismus schneller, so dass also die Vertheilung der Masse von wesentlichem Einfluss auf diese Erscheinung ist.

Weitere Versuche hierüber haben Donati und Poloni [1]) angestellt. 320

Auf eine Eisenstange von 2,3 m Länge und quadratischem Querschnitt von 18 mm Seite wird 20 cm vom einen Ende eine Magnetisirungsspirale von 50 Windungen und 3 cm Länge, sowie an verschiedenen Stellen im Abstande x eine Inductionsspirale von 50 Windungen und 1 cm Länge geschoben, welche Spiralen schon in einer Entfernung von 5 cm nicht mehr merklich direct inducirend auf einander wirken.

Wenn nach der Zeit t nach dem Schliessen der magnetisirenden Ströme der Kreis der mit dem Galvanometer verbundenen Inductionsspirale unterbrochen wird, so ist der Ausschlag A des Galvanometers, welcher dem an der Stelle x während der Zeit t erzeugten Moment entspricht, gleich:

$$A = c e^{-\alpha x}(1 - \varrho e^{-\mu t} + \varrho' e^{-\mu' t})$$

oder auch annähernd:

$$A = c e^{-\alpha x}\left(1 - e^{-\varkappa \frac{t}{x}}\right),$$

wo $c, \alpha, \mu, \mu', \varkappa, \varrho, \varrho'$ Constante sind und $\varrho + \varrho' = 1$ ist. Für $t = \infty$ ist dann $A_\infty = c e^{-\alpha x}$, der schon bekannte Ausdruck der endlichen Vertheilung des Momentes.

Die Versuche wurden mit verschiedenen Stromintensitäten I (verschiedenen Anzahlen von Bunsen'schen Elementen) angestellt. Selbstverständlich zeigen sich in den Werthen A_∞ dieselben Aenderungen, wie sie für die Zunahme des Momentes eines Stabes mit wachsenden magnetisirenden Kräften I bekannt sind, so dass also c schneller als I wächst.

Die Werthe α, ϱ und ϱ', μ und μ' ändern sich ebenfalls mit der Entfernung x.

Aus diesen Resultaten folgt, dass der Abstand des Schwerpunkts der Fläche der die Momente der einzelnen Stellen als Ordinaten zum Magnet als Abscissenaxe darstellenden Curve von dem magnetischen Centrum mit der Zeit im umgekehrten Verhältnisse des Coefficienten α von x sich ändert. Die Stelle, bei welcher der Werth der Klammer ein bestimmter, β, ist, verschiebt sich nahezu gleichförmig, wenn auch verschieden schnell bei verschiedenen Werthen von β, die Zeit also, in der die in jedem Querschnitt erzeugten Momente einen bestimmten Bruchtheil des demselben Querschnitt entsprechenden Maximalmoments erhalten, wächst etwa proportional mit dem Abstande von dem Orte der Magnetisirung. — Eine Fehlerquelle bei diesen Versuchen liegt darin, dass nach dem Oeffnen des magnetisirenden Stromes der Magnetismus der darunter liegenden Theile nicht plötzlich verschwindet, und somit auf die ferneren Theile des Stabes vertheilend einwirken kann.

[1]) Donati und Poloni, Nuovo Cimento, [2] 13, p. 97, 242, 1875*.

321 Bei ähnlichen Versuchen von Harold Whiting[1]) wurde auf eine $^1/_2$ Zoll dicke Eisenstange an einem Ende eine Magnetisirungsspirale, an anderen Stellen eine mit einem Galvanometer verbundene Inductionsspirale geschoben. Durch einen Commutator, ähnlich dem von Blaserna (§. 287), wurden die magnetisirenden Ströme in abwechselnder Richtung durch die Magnetisirungsspirale geleitet und die Ströme der Inductionsspirale gleich gerichtet zum Galvanometer geführt. Zuerst wurden bei langsamer Commutation des magnetisirenden Stromes die Nullpunkte der Stellung des Commutators im inducirten Kreise bestimmt, bei denen das Galvanometer keinen Ausschlag gab. Sodann wurde die Einstellung des Commutators bei schneller Drehung und verschiedener Lage der Inductionsspirale untersucht. Dabei wuchs die Verzögerung der Magnetisirung mit wachsenden Abständen von der primären Spirale allmählich bis zu einem Maximum und nahm bei weiterer Entfernung wieder ab. Auch die Phase des primären Stromes wurde mit wachsender Geschwindigkeit des Commutators immer mehr verzögert (bis zu 90^0).

Bei einem Stabe von 53 Zoll Länge und $^1/_2$ Zoll Dicke erschien bei der Umdrehungsgeschwindigkeit $v = 4$ in der Secunde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c auf den ersten 7 Zollen des Stabes gleich 25 Fuss, bei der Umdrehungsgeschwindigkeit $v = 23$ aber $c = 90$ Fuss. Dann wurde c nahe proportional v, so dass für $v = 140$, $c = 300$ Fuss betrug. In weiteren Entfernungen überwiegt die Wirkung der primären Spirale und der benachbarten magnetischen Theile, so dass sich keine einfachen Resultate ergeben.

Unter längerem Einfluss alternirender Ströme von hoher elektromotorischer Kraft wächst die Leitungsfähigkeit (z. B. auf das 12 fache).

Bei einer nur 20 Zoll langen Stange ergaben sich nahe dieselben, bei einer nur $^1/_4$ Zoll dicken Stange viel kleinere Phasendifferenzen bei derselben Drehungsgeschwindigkeit des Commutators. Eine Stahlstange verhielt sich etwa wie die dünnere Eisenstange. Die magnetische Leitungsfähigkeit in derselben ist etwa $^1/_4$ von der der Eisenstange.

Werden die Commutatoren so gestellt, dass das Galvanometer Ströme giebt, so ist bei günstigster Anordnung der Commutatoren die Ablenkung des Galvanometers von ihrer gemeinsamen Drehungsgeschwindigkeit (5 bis 12 Umdrehungen, 10 bis 24 Umkehrungen per Secunde) unabhängig; erst bei grösserer Geschwindigkeit sinkt sie (bei 140 Umdrehungen auf $^1/_4$). Dividirt man die Ablenkungen durch die entsprechende Umdrehungszahl des Commutators, so erhält man die Höhe jeder Welle am Ende der kurzen Dauer des Stromes. Danach ist die Gestalt der magnetischen Welle in einigem Abstand von der primären Spirale nahe gleich der einer elektrischen Welle am Ende eines langen Kabels; in der Nähe der primären Spirale werden die Curven eckiger, ohne indess wie bei momentaner Wirkung rechteckig zu werden. Die Zeit zwischen dem Beginn

[1]) H. Whiting, Proc. Amer. Acad. 14, p. 322, 1881*; Beibl. 5, p. 689*.

und der Erreichung von 50 Proc. des Maximums des secundären Stromes, dicht neben der primären Spirale, betrug etwa 0,058 Secunden; etwa 14 Zoll von derselben noch 0,035 Secunden mehr. Für andere Stromstärken des secundären Stromes würden sich andere Data ergeben.

Alle diese Versuche geben übrigens nicht ganz einfache Resultate, da einmal die die magnetisirenden Spiralen durchfliessenden Ströme beim Oeffnen und Schliessen direct in der Inductionsspirale Ströme induciren können, dann aber auch namentlich nicht nur die unter der Inductionsspirale liegenden Eisentheile, sondern auch die übrigen, vorzüglich die der magnetisirenden Spirale zu liegenden, stärker magnetisirten beim Verschwinden ihres Magnetismus inducirend wirken.

322 Stellt man vor den Pol eines Elektromagnetes in verschiedenen Entfernungen zwei Inductionsspiralen auf, in denen beim Oeffnen oder Schliessen des den Elektromagnet erregenden Stromes Ströme von gleicher Gesammtintensität erzeugt werden, so dass bei entgegengesetzter Einschaltung derselben in einen Schliessungskreis zugleich mit einem Galvanometer letzteres keine Ablenkung zeigt, so bleibt dieses Gleichgewicht bestehen, wenn nicht magnetische Medien zwischen die Spiralen gebracht werden. Lässt man mit Hülfe des Interruptors von Felici nur die letzten Theile des Oeffnungsinductionsstromes eintreten, so zeigt das Galvanometer einen Ausschlag im Sinne des Stromes in der ferneren Spirale; beim Eintritt des ersten Theils des Oeffnungsstromes überwiegt die Induction in der näheren Spirale[1]).

Die Ablenkung steigt mit der Zeitdauer der Verbindung mit dem Galvanometer bis zu einem Maximum.

Ebenso verhalten sich die Schliessungsströme und die bei Umkehrung der Polarität des Magnets erhaltenen Ströme.

Der Magnet kann hierbei auch durch eine inducirende Spirale ersetzt werden. Die Erscheinungen rühren eben von den Extraströmen in den Spiralen her, die in der entfernteren, welche aus mehr Windungen besteht, bedeutender sind, als in der näheren, also in ersterer die Induction mehr verzögern, als in letzterer. Beim Entstehen des Inductionsstromes subtrahiren sich diese Extraströme von dem Hauptstrom, beim Verschwinden addiren sie sich dazu, wodurch obige Beobachtungen vollständig erklärt werden. Deshalb haben auch Aenderungen des Abstandes, z. B. bei Aenderung der Verhältnisse der inducirenden Spirale u. s. f., keinen Einfluss auf das Phänomen.

323 Ganz ähnliche Erscheinungen, wie bei der longitudinalen Magnetisirung des Eisens, zeigen sich bei der transversalen durch einen hin-

[1]) L. Donati und G. Poloni, Nuovo Cimento [2] 13, p. 233, 1875*. Einige Versuche über die Zeitdauer der Induction bei Gegenwart von Eisenkernen mittelst Messungen der elektrostatischen Ladung eines Condensators siehe Donati, Sulla forze elettromotrice, Pisa 1875*.

durchgeleiteten Strom[1]). Wird also in einen Schliessungskreis einer Säule ein Eisendraht eingefügt, so entsteht beim Schliessen des Stromes in Folge der transversalen Magnetisirung der einzelnen Molecüle des Eisendrahtes ein dem ursprünglichen Strom entgegengerichteter Inductionsstrom, wodurch die Entwickelung des Stromes verzögert wird. Wird umgekehrt der Strom geöffnet, so entsteht wiederum durch das Verschwinden des transversalen Momentes des Eisendrahtes ein dem ursprünglichen Strom gleichgerichteter Strom, welcher ihn im letzten Moment verstärkt. Aehnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn der Eisendraht in die Schliessung einer Inductionsspirale eingefügt wird, in welcher durch Schliessen und Oeffnen des Stromes in einer benachbarten Spirale Ströme inducirt werden. Schaltet man in den Inductionskreis eine kleine Kupferdrahtspirale ein, in welche man Nähnadeln einlegt, so kann man an der geringeren Magnetisirung derselben durch die Inductionsströme bei Einfügung des Eisendrahtes oder eines Kupferdrahtes von gleichem Widerstand erkennen, dass durch ersteren die Inductionsströme verzögert worden sind. Selbstverständlich ist an einem Galvanometer die Gesammtintensität der inducirten Ströme in beiden Fällen die gleiche.

324 Bei diesen Versuchen kann man, ohne die Resultate abzuändern, den Eisendraht direct zu einer Spirale winden und als inducirte verwenden.

Wird an Stelle einer Kupferdrahtspirale eine Eisendrahtspirale von gleichen Dimensionen als inducirende verwendet, so wird wiederum beim Schliessen des inducirenden Stromes die Entwickelung desselben verzögert und ebenso auch die des Inductionsstromes, dessen magnetisirende Wirkung auf die Nähnadel bei gleicher Intensität des inducirenden Stromes demnach kleiner ist.

Da mit wachsender Stromintensität die transversale Magnetisirung der Eisendrähte sich viel schneller einem Maximum nähert, als die longitudinale, so ist die verzögernde Wirkung der Eisendrähte namentlich bei schwächeren Strömen bemerkbar[2]).

325 In Folge der verzögernden Wirkung der in den Eisendrähten auftretenden Extraströme ist die durch alternirende oder oft unterbrochene Ströme erzeugte Erwärmung derselben cet. par. geringer, als bei nicht magnetischen Drähten von gleichem Widerstand. Dies hat Villari[3]) gezeigt, indem er den Strom einer Säule zwischen zwei öfter der Länge nach auf und nieder gebogenen Drähten von Kupfer oder Blei und von Eisen neben einander verzweigte, welche in der Wheatstone'schen Brücke für constante Ströme gleichen Widerstand hatten. Die Drähte befanden sich in 1 m langen, mit Alkohol gefüllten Glasröhren, durch

[1]) Vergl. Villari, Nuovo Cimento [2] 11, p. 201, 1874*. — [2]) Villari l. c. — [3]) Villari, N. Cimento [2] 11, p. 63, 1874*.

welche unten mittelst Korken ihre Enden hindurchgingen und die oberhalb durch Korke geschlossen waren, durch welche Capillarröhren mit Theilungen zur Messung des Standes des Alkohols gesteckt waren. Während die durch einen constanten Strom entwickelten Wärmemengen gleich waren, erschien bei Anwendung unterbrochener Ströme die Erwärmung des nicht magnetischen Metalles grösser.

Auch mittelst eines Dynamometers, dessen beide Spiralen aus je zwei gleichen und parallel neben einander liegenden Drähten gewunden waren, durch welche neben einander in entgegengesetzter Richtung der zwischen dem Kupferdraht und dem Eisendraht verzweigte Strom hindurchging, ergab sich dasselbe Verhalten. 326

Wenn bei Anwendung eines constanten Stromes die Ablenkung der bifilar aufgehängten Rolle Null war, erfolgte sie bei Anwendung unterbrochener Ströme im Sinne des durch den Kupferdraht fliessenden Zweiges, indem wiederum die Ströme im Eisendraht verzögert wurden. — Auf eine directe Widerstandsänderung des Eisendrahtes durch die unterbrochenen Ströme sind diese Erscheinungen nicht zu beziehen.

2. Anomale Magnetisirung.

Die Umkehrung des Magnetismus eines Magnets durch Kräfte, welche schwächer und den ursprünglich magnetisirenden Kräften entgegengerichtet sind, kann zuweilen Veranlassung zu anomalen Magnetisirungen beim Verschwinden des Stromes in einer Magnetisirungsspirale geben. 327

Dieselben sind zuerst beobachtet worden, als die Entladung einer Leydener Batterie durch eine Drahtspirale geleitet wurde, in welcher eine Stahlnadel lag, oder durch einen geraden Draht, über welchen man in verschiedener Entfernung und in transversaler Lage Stahlnadeln gelegt hatte. Je nach den Bedingungen des Versuches war der Magnetismus der Nadeln normal oder demjenigen gleichgerichtet, welchen man durch einen constanten galvanischen Strom erzielen würde, der in gleicher Richtung wie der Entladungsschlag der Batterie bei den Stahlnadeln vorbeigeführt würde, oder entgegengesetzt.

Schon Savary[1]) hat gezeigt, als er den Batterieschlag durch einen auf einem geraden Brett ausgespannten Platindraht von $^1/_4$ mm Dicke und 1 m Länge hindurchgehen liess, dass Stahlnadeln von 15 mm Länge und $^1/_4$ mm Dicke, welche auf einer gegen das Brett in einem spitzen Winkel geneigten Leiste, also in verschiedenen Entfernungen von dem 328

1) Savary, Ann. de Chim. et de Phys. 34, p. 5, 1826*; Pogg. Ann. 8, p. 352, 1826, 9, p. 443, 10, p. 73, 1827*.

Draht transversal befestigt waren, je nach ihrer Entfernung e von dem Draht abwechselnd stärker und schwächer, theils entsprechend den galvanischen Wirkungen normal (+), theils entgegengesetzt (—) magnetisirt wurden. So ergaben sich z. B. die Dauern t von 60 Schwingungen derselben:

$e =$	0	1,1	2	3	5,5	8	8,6	10,5
t	+ 63,1	— 149,0	0	+ 85,6	+ 63,0*	+ 92,2	— 188,0	— 77,2
$e =$	14,6	15,7	18,2	20,0	20,9	21,4	23,3	44
t	— 56,0*	— 59,4	— 65,0	— 94,2	— 149,0	0	+ 83,3	+ 34,0*
$e =$	70	100	130					
t	+ 43,2	+ 62,2	+ 88,2					

Die mit einem Stern versehenen Zahlen bezeichnen Minima der Magnetisirung. An verschiedenen Stellen der Schliessung ist das Verhalten das gleiche.

Bei Nadeln von wachsender Härte rückt das Maximum weiter vom Draht ab und ist grösser. Bei wachsender Dicke d zeigt sich eine immer geringere Unregelmässigkeit, wobei freilich auch die dickeren Nadeln weicher sind. So war z. B.:

	$d =$ 0,3	0,8	1,75
$e =$ 0,8	$t =$ + 70	+ 120	+ 99
17,0	— 58	+ 59	+ 106
27,0	+ 38	+ 63	+ 117

Die Länge der Nadeln hat innerhalb gewisser Grenzen keinen Einfluss auf die Perioden.

Mit wachsender Ladung der Batterie tritt bei Nadeln, welche in einer Drahtspirale magnetisirt werden, ebenfalls erst die normale Magnetisirung auf, der dann abwechselnd anomale und normale Perioden folgen.

329 Die Ursache dieser Anomalien ist das Oscilliren der Entladungen der Batterie. Nach Bd. III, §. 496 kann eine durch einen Strom erzeugte permanente Magnetisirung durch einen schwächeren Gegenstrom vernichtet, resp. umgekehrt werden. Sind also bei den oscillirenden Entladungen die Stahlstäbe alternirend gerichteten, immer schwächer werdenden Strömen ausgesetzt, so hängt es ganz von dem Verhältniss der Maximaldichtigkeiten derselben ab, in welchem Sinne und wie stark die Stahlstäbe nach der gesammten Entladung magnetisirt sind. Da die Magnetisirungen und Entmagnetisirungen durch die auf einander folgenden entgegengesetzten Ströme durchaus nicht proportional den Dichtigkeiten derselben, resp. den auf die Stahlstäbe in ihrer jeweiligen Lage wirkenden Kräften sind, sondern beide in verschiedener Weise von den letzteren abhängen, so kann in gewissen Entfernungen die Wirkung der magnetisirenden, in anderen die der entmagnetisirenden Kräfte überwiegen

und so können Perioden in der Stärke und Richtung der Magnetisirung bei wachsendem Abstand der Stäbe von dem Entladungskreis hervortreten.

330 Dass in der That die Oscillationen der Entladungen diese Umkehrungen bedingen, zeigen Versuche von v. Liphart[1]). Er magnetisirte Stahlnadeln in Spiralen von Kupferdraht (3138 m von 0,18 mm Dicke in 18170 Windungen) und bestimmte ihre Magnetisirung durch Ablenkung eines Magnetspiegels.

Jedesmal, wenn die Lichterscheinung in einer in den Schliessungskreis eingeschalteten Geissler'schen Röhre eine einseitige Richtung des Stromes angab, erfolgte eine normale Magnetisirung im Sinne desselben; zeigten sich abwechselnd gerichtete Entladungen bei zunehmender Schlagweite des im Schliessungskreise befindlichen Funkenmikrometers, so trat zuerst eine Schwächung, dann eine Umkehrung der Magnetisirung mit steigender, darauf abnehmender Stärke und wieder eine normale und eine darauf folgende anomale Magnetisirungsperiode ein. Da erst bei grösseren Widerständen im Schliessungskreise die Stromesrichtung einfach wird, zeigt sich dann auch bei diesen die normale Magnetisirung.

Wird eine Funkenstrecke unter einem Mikroskop in den Schliessungskreis gebracht, so zeigt die Lichterscheinung jedesmal alternirende Entladungen an, wenn Umkehrungen der Magnetisirung bei verschiedener Funkenlänge auftreten. Dabei erhält man oft schon ohne Funkenbahn anomale Magnetisirungen. Wird der Strom durch eine Feddersen'sche Ventilröhre von der Mitte aus nach entgegengesetzten Richtungen zu ihren Enden und von diesen durch zwei Systeme von Magnetisirungsspiralen geleitet, so entspricht, wenn die Entladungen völlig geschieden sind, ebenfalls in jedem derselben die Magnetisirung der jeweiligen Stromesrichtung.

Bei Einschaltung flüssiger Widerstände (verdünnte Schwefelsäure vom specif. Gew. 1,25 bis 1,3), die selbst viel kleiner sind, als metallische Widerstände, welche sonst schon abwechselnde Magnetisirungen zeigen, und einer Geissler'schen Röhre in den Schliessungskreis erhält man fast stets normale Magnetisirungen, so dass also die rücklaufenden Entladungen sehr bedeutend geschwächt werden. Erst bei Wollaston'schen Elektroden in der Säure zeigten sich Alternationen in der eingeschalteten Geissler'schen Röhre und in der Magnetisirung. Das letztere tritt auch bei Fortlassung der Geissler'schen Röhre ein. Bei Einfügung einer Alkoholsäule werden die Entladungen wieder einfach, die Magnetisirungen normal.

331 Auch noch durch eine andere Methode kann man zeigen, dass die Stahlnadeln bei den anomalen und periodischen Magnetisirungen entgegengesetzt magnetisirenden Kräften unterworfen waren.

---

[1]) von Liphart, Pogg. Ann. 116, p. 513, 1862*.

Klopft man eine durch den Batteriestrom magnetisirte Nadel, so nimmt z. B. bei wachsender (durch die Wärmewirkung im Luftthermometer gemessener) Intensität des Stromes der durch schwächere Ströme erzeugte normale Magnetismus der Nadeln zu, der durch stärkere erzeugte anomale ab oder kehrt sich um; entsprechend den Bd. III, §. 757 erwähnten Versuchen, nach denen Magnetnadeln, welche nach einander entgegengesetzte Magnetisirungen erhalten haben, bei Erschütterungen mehr oder weniger die den früheren Kräften entsprechenden Magnetismen annehmen [1]).

Bei der Complicirtheit der bei den alternirenden Strömen auftretenden Magnetisirungen sind auch für die normalen und anomalen Magnetisirungen durch Batterieentladungen einfache Resultate nicht zu erwarten.

Wir führen deshalb aus einer Reihe früherer Beobachtungen, namentlich von Hankel [2]), welche vor der Kenntniss der oscillirenden Entladungen angestellt waren, nur einige Hauptdata an.

332 Werden Stahlnadeln in Spiralen durch den Entladungsstrom der Batterie magnetisirt, so ist mit wachsender Ladung der Batterie die Magnetisirung erst normal, dann wird sie anomal, und eventuell wieder normal u. s. f. Die Zahl der Perioden ist dabei unbegrenzt; sie folgen in regelmässigen Intervallen auf einander. Je kleiner der Widerstand, desto früher tritt die anomale Periode auf und desto kürzer ist sie. Bei sehr kleinem Widerstand reducirt sie sich auf ein Minimum der normalen Magnetisirung. Bei grösserem Widerstand erhält man nur die erste normale und erste anomale Periode, bei sehr grossem nur die erste normale Periode [3]).

Bei grösserer Dichtigkeit der Ladung und gleicher Elektricitätsmenge in der Batterie tritt die Umkehrung schon bei Widerständen ein, bei welchen sie bei kleineren Dichtigkeiten sich nicht zeigt, bei grösseren Widerständen erscheint dementsprechend bei wachsender Stromesdichtigkeit an Stelle der Umkehrung nur ein Minimum der normalen Magnetisirung.

Die Magnetisirung durch verschiedene Spiralen ist proportional der Anzahl der die Nadel bedeckenden Windungen; die normalen und anomalen Perioden treten bei gleichen magnetisirenden Kräften (Ladung der Batterie mal Windungszahl der Spiralen) ein; die Maxima und Minima sind um so stärker, je geringer die hierzu erforderliche Ladung der Batterie ist. Je stärker die Selbstinduction eines Spiraldrahtes ist (also wenn die Entladung alle Windungen in gleichem Sinne durchläuft), desto mehr werden die anomalen Perioden erweitert und verstärkt, so dass sie den normalen mehr gleich werden.

---

[1]) Paalzow, Pogg. Ann. 117, p. 645, 1862*. — [2]) Hankel, Pogg. Ann. 65, p. 537, 1845, 69, p. 321, 1846*. — [3]) Auch schon Savary, l. c.

Schaltet man in die Schliessung auch noch Drahtspiralen ein, so werden durch die Selbstinduction derselben die anomalen Perioden verstärkt und erweitert, so dass sie den normalen mehr gleich werden.

Im Allgemeinen schwächt also jede Verzögerung der Entladung die anomale Magnetisirung.

Da bei Anwendung von Eisendrähten zur Leitung des Batteriestromes die Transversalmagnetisirung derselben besondere Inductionsströme in ihnen erzeugt, so wird dadurch wiederum der Gang der Entladung geändert und ebenso der der Magnetisirungsperioden.

Dickere Nadeln zeigen im Allgemeinen dieselben Erscheinungen; die anomalen Perioden treten aber erst bei grösseren Ladungen auf und können weniger stark sein (siehe §. 328).

333 Liegen die Stahlnadeln in leitenden Hüllen, so entstehen auch in diesen letzteren Inductionsströme, wenn die Batterieentladung durch eine dieselben umgebende Spirale geleitet wird, und die Magnetisirung der Nadeln kann sich dadurch ändern [1]). So magnetisirten sich z. B. die Nadeln bei einigen Versuchen von Savary [2]) in dünnen, schlechter leitenden Metallhüllen stärker, in dicken Hüllen schwächer, nach Savary und Boekmann [3]) nicht in Eisenröhren, deren Magnetisirung der Wirkung der Spirale entgegenwirkt.

In ähnlicher Weise erfolgte nach Dove [4]) bei Einlegen verschiedener Körper in die eine Spirale des Differentialinductors und entgegengesetzter Verbindung der Inductionsspiralen durch eine Magnetisirungsspirale, in welcher sich eine Stahlnadel befand, die Magnetisirung im Sinne der leeren Spirale, wenn die andere enthielt: Bleche von Indium, Gold, Silber, Legirung von Kupfer-Wismuth-Antimon, oder von Kupfer-Blei-Zink-Antimon, Blei-Eisen, Messing-Eisen, Glockenmetall, der Quere nach zusammengefaltete Kupferstreifen u. s. f.; im Sinne der vollen Spirale, wenn sie enthielt: Eisendrahtbündel, eine Säule von Stahl-, Eisenblech, Weissblechscheiben, massive Cylinder von Schmiedeeisen, Stahl, Roheisen, eine Röhre von Nickel.

334 Bei messenden Versuchen schaltete Riess [5]) in den Schliessungskreis einer Batterie zwei ganz gleiche Spiralen I und II aus mit Kautschuk überzogenem Kupferdraht ein, und brachte in beide Glasröhren mit $2^1/_2$ Zoll langen Stahlnadeln; nur war die eine Glasröhre II mit verschieden dicken Hüllen von Stanniol bekleidet, auch wurde sie durch eine Bleiröhre oder Kupferröhre ersetzt. Die Magnetisirung der Nadeln wurde durch die Ablenkung α einer Magnetnadel bestimmt, welcher sie in gleicher Lage gegenübergestellt wurden. So ergab sich z. B.:

---

[1]) Matteucci, Compt. rend. **23**, p. 460, 1846*. Marianini, Archiv **5**, p. 53, 1847*. — [2]) Savary, l. c. — [3]) Boekmann, Gilb. Ann. **68**, p. 12, 1821*. — [4]) Dove, Abh. d. Berl. Acad. 1841*. — [5]) Riess, Berl. Monatsber. 1863, p. 346*; Abh. **1**, p. 74*; Pogg. Ann. **122**, p. 304, 1864*.

	Stanniol					
	0,01	0,03	0,04	0,06	0,10	0,14 Lin. dick
mit Hülle $\alpha =$	26,5	31,5	32	33,7	31,2	28
ohne Hülle $\alpha =$	26,3	26,5	26,2	26,5	25,8	24

	Stanniol	Blei	Kupfer
	0,27	1,00	1,10 Lin.
mit Hülle $\alpha =$	26	6	2
ohne Hülle $\alpha =$	25,3	25,7	27,5

Bei Vermehrung der Dicke der Stannioleinschaltung nahm also erst die Magnetisirung zu, dann wieder ab, und noch mehr, wenn die Hüllen noch leitender waren.

335 Statt der Röhren können auch Drahtspiralen um die Glasröhre II gewunden werden, die etwa auch noch mit einer Spirale verbunden sind, in welcher sich eine dritte Nadel III befindet. Dann wird letztere durch die Nebenströme magnetisirt. Die Ablenkungen durch die Nadeln nach der Magnetisirung waren z. B., als nach einander immer weniger Widerstand w in die Schliessung der beiden letzten Spiralen eingefügt wurde:

I	32,3	31,5	33,7	31,5	31,9
II	32,5	33,8	37,7	40,5	43,6
III	—	—	—	—	—

I	31,6	31,7	30,5	31,1	30,7	31,1	33,0
II	47,5	51,9	42,7	36,6	30,5	24,6	5,5
III	— 1,6	+ 1	— 4	— 6	— 7	— 9,2	— 10,6

Das + Zeichen deutet in der letzten Reihe eine normale Magnetisirung durch einen Strom an, der in Spirale II dem Hauptstrome gleichgerichtet wäre. Die Reihe II zeigt, dass hier die secundäre Spirale bei abnehmendem Widerstand ebenso wie zunehmend dickere Metallhüllen wirkt; Reihe III, dass die Magnetisirungen von den auf einander folgenden entgegengerichteten Inductionsströmen in der Nebenleitung beim Entstehen und Vergehen des Hauptstromes, event. von den Extraströmen im Nebenkreise selbst bedingt sind. Da die zur Umkehrung der Magnetisirung der Nadeln erforderlichen Stromesdichtigkeiten nicht bekannt sind, so lassen sich aus den Zahlenwerthen keine directen Schlüsse auf den Verlauf dieser einzelnen Ströme ziehen.

Dass sich bei Zwischenschaltung von schlecht leitenden Körpern zwischen den magnetisirenden Draht und die Stahlnadeln, z. B. von Glimmerblättern, Terpentinöl, Alkohol, Olivenöl, Wasser, die Magnetisirung der Nadeln verändert[1], dürfte kaum richtig sein.

---

[1]) Matteucci, Institut 1847, Nr. 695, p. 148*.

Wie durch die Ströme zweiter Ordnung, können Stahlnadeln auch durch Ströme höherer Ordnung magnetisirt werden; da sie indess aus immer mehr abwechselnd gerichteten Strömen bestehen, je höheren Grades sie sind, so werden die Erscheinungen immer complicirter. Die Magnetisirung der Stahlnadeln giebt durchaus keine Entscheidung für ihre Richtung [1]). 336

Wird bei obigen Versuchen in den Kreis der Nebenspirale ein Ventil in der einen oder anderen Lage eingeschaltet, so bleibt die Magnetisirung durch den Hauptstrom bei gleicher Menge der entladenen Elektricität stets die gleiche und normal; im Nebenstrom ist sie grösser, und entsprechend dem von der Fläche zur Spitze des Ventils gehenden Antheil, aber bei beiden Lagen des Ventils gleich gross, da nur die in jener Richtung verlaufenden Antheile des Inductionsstromes durch das Ventil hindurchgehen [2]). 337

Auch beim Magnetisiren von Stahlstäben durch eine vom galvanischen Strom durchflossene Magnetisirungsspirale können nach dem Oeffnen des Stromes anomale permanente Magnetisirungen auftreten. 338

Diese Erscheinung ist zuerst von v. Waltenhofen [3]) beobachtet worden.

Magnetisirt man einen sehr weichen Eisenkern durch einen Strom und unterbricht den letzteren plötzlich, so ist dabei das zurückbleibende Residuum an permanentem Magnetismus viel kleiner, als bei langsamer Unterbrechung unter Einschaltung immer grösserer Widerstände. Bei schneller Unterbrechung zeigt sich zuweilen, namentlich bei dickeren Stäben, z. B. von 20 bis 28 mm Durchmesser und 103 mm Länge eine umgekehrte permanente Magnetisirung.

Ist der Eisenkern schon früher in dem normalen Sinne durch einen langsam geöffneten Strom permanent magnetisirt worden, so erscheint beim Herumleiten eines zweiten gleich gerichteten Stromes und schnellen Oeffnen desselben diese Anomalie nicht, wohl aber, wenn die erste permanente Magnetisirung entgegengerichtet war.

Bei ganz langsamem Oeffnen des magnetisirenden Stromes, z. B. unter allmählicher Einschaltung immer grösserer Widerstände, wie von Säulen von Zinkvitriollösung, zeigt sich nie die anomale Magnetisirung [4]).

---

[1]) Vgl. hierüber Henry, Sturgeon, Annals of El. 4, p. 300*. Matteucci, Bibl. univ. Oct. 1840, p. 122*, und namentlich Riess, Pogg. Ann. 47, p. 62, 1839*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 120, p. 513, 1863*; Abhandl. 1, p. 318*. — [3]) v. Waltenhofen, Wien. Ber. [2] 48, p. 564, 1863*; Pogg. Ann. 120, p. 560, 1863*. Ganz analoge Beobachtungen sind 17 Jahre später nochmals von Righi (Compt. rend. 90, p. 688, 1880*; Beibl. 4, p. 556*) veröffentlicht worden. — [4]) Bartoli und Alessandri, Nuovo Cimento [3] 8, p. 16, 1880*; Beibl. 4, p. 738*.

339 Eine Reihe hierher gehöriger Versuche hat Righi[1]) angestellt, bei denen er den magnetisirenden Strom in einer Spirale sowohl schnell und langsam schloss, wie auch öffnete. Er erhielt im Wesentlichen folgende, zum Theil das bereits Bekannte bestätigende Resultate:

1) Der permanente Magnetismus eines Stabes wächst ein wenig, wenn man ihn mit einer Metallhülle umgiebt, um so mehr, je dicker sie ist, je dicker und kürzer der Stab, je kleiner die Zahl der Windungen der Magnetisirungsspirale.

2) Schliesst man den Strom langsam und öffnet ihn schnell, so erlangt ein von einer Metallröhre umgebener Stab mehr permanenten Magnetismus, als wenn er neben der Röhre liegt; schliesst man dagegen den Strom schnell und öffnet ihn langsam, so tritt das entgegengesetzte Verhalten ein.

3) Ein in einer Eisenröhre befindlicher Stahlstab magnetisirt sich weniger, wenn sie ganz ist, als wenn sie aufgeschlitzt ist. Der Unterschied ist um so bedeutender, je schwächer der Strom ist; er verschwindet bei langsamer Schliessung.

4) Der Magnetismus dringt um so tiefer in einen Stahlstab ein, je langsamer der Strom geschlossen wird (durch Abätzen nachgewiesen, wobei sich aber die Vertheilung vollständig ändert).

5) Bei schneller Oeffnung des Stromkreises vermindert sich der Magnetismus des Stabes, namentlich in den Oberflächenschichten. Er kann demzufolge in den inneren Theilen stärker magnetisirt bleiben, als in den Schichten nahe der Oberfläche oder in letzteren eine entgegengesetzte Polarität zeigen.

6) Der temporäre Magnetismus eines Stabes ist um so grösser, je schneller der Strom geschlossen wird.

7) Der permanente Magnetismus eines Stahlstabes ist um so grösser, je schneller er der Stromeswirkung ausgesetzt wird, z. B. bei momentanem Schliessen des Stromes, statt bei langsamem. Die Differenz zwischen beiden Resultaten ist um so grösser, je kürzer der Stab im Verhältniss zu seiner Länge und je kürzer der Draht der Magnetisirungsspirale ist.

8) Der permanente Magnetismus eines Stahlstabes ist um so grösser, je langsamer er der magnetisirenden Wirkung entzogen wird (bei schnellerem und langsamerem Oeffnen des magnetisirenden Stromes).

9) Werden gleichzeitig zwei gleiche aber verschieden harte Stäbe in derselben Spirale magnetisirt, so ist die Verminderung des Magnetismus durch ihre Wechselwirkung in dem weicheren grösser.

10) Wird der Strom langsam geschlossen und schnell geöffnet, so erhält der weichere Stab mehr Magnetismus; wird er schnell geschlossen und langsam geöffnet, der härtere.

11) Werden zugleich zwei verschieden dicke Stäbe magnetisirt, so erleidet der dickere den Einfluss ihrer Wechselwirkung am meisten.

---

[1]) Righi, Mem. di Bologna [4] 1, 20. Mai 1880*; Beibl. 5, p. 62*.

Bei in einander geschobenen Röhren erhält man die entgegengesetzten Resultate.

12) Werden immer kürzere Stäbe von gegebener Dicke magnetisirt, so nimmt der permanente Magnetismus erst bis zu Null ab und kehrt sich dann um. Die Umkehrung tritt bei um so grösserer Länge ein, je schwächer der Strom ist.

13) Mit wachsender Stromintensität wächst der umgekehrte Magnetismus erst bis zu einem Maximum, nimmt dann bis zu Null ab und geht zuletzt in den normalen Magnetismus über.

14) Die Umkehrung zeigt sich nur bei schneller Oeffnung des Stromes. Bei schneller Schliessung zeigt sich die Umkehrung nicht bei einer schwächeren Stromintensität, bei welcher sie bei langsamer Schliessung noch auftritt. Der Einfluss dieser Art der Schliessung ist um so deutlicher, je geringer die Zahl der Windungen der Magnetisirungsspirale ist.

15) Entwickelt der Stab beim Oeffnen des Stromes in einer benachbarten Metallmasse inducirte Ströme, so bleibt die Polarität entweder umgekehrt, wird aber schwächer, oder die normale Magnetisirung tritt auf.

Auch Fromme[1]) hat ausgedehnte Untersuchungen über die Magnetisirung von Eisen- und Stahlstäben angestellt, welche theils vor dem Schliessen und Oeffnen des Stromes aus der Magnetisirungsspirale entfernt wurden, theils nach demselben. Die Stäbe wurden in zwei Spiralen magnetisirt, deren eine 420 mm Länge, 1382 Windungen von 2,6 mm dickem Draht (2 mm ohne Umspinnung) hatte und auf ein geschlossenes Messingrohr von 8,7 mm Durchmesser gewunden war, deren andere von 500 mm Länge, 1859 Windungen von 1,92 resp. 1,75 mm dickem Draht auf ein Papprohr von 25 mm Durchmesser gewickelt war. Der Strom wurde von 2 Bunsen'schen Elementen geliefert. Er wurde entweder (*f*) plötzlich geschlossen oder geöffnet, während die Stäbe fest in der Spirale lagen, oder (*a*) die Stäbe wurden nach dem Stromschluss oder vor der Oeffnung in die Spirale geschoben oder herausgezogen. **340**

Wir bezeichnen mit *a* und *f* die in beiden Fällen erhaltenen Resultate, mit T, P, $V = T - P$ den gesammten oder temporären, den permanenten und verschwindenden Magnetismus.

Aus den Versuchen ergeben sich folgende Hauptresultate.

1) Zunächst ist das totale temporäre Moment $T_a < T_f$, dagegen das permanente Moment $P_a > P_f$.

2) Die Unterschiede werden mit wachsendem Dimensionsverhältniss α (Länge: Dicke) und wachsender Härte der Stäbe kleiner; die ohnehin weniger verschiedenen Momente T werden bei sehr dünnen Eisendrähten und Stahlstäben und -Drähten fast Null.

[1]) Fromme, Wied. Ann. **5**, p. 345, 1878*, **13**, p. 323, 1881*, **18**, p. 442, 1883*.

3) Das Verhältniss $(P_a - P_f) / P_a$ ist bei Stahlstäben und Bündeln von Eisen- oder Stahldraht viel geringer, als bei massiven Eisenstäben von gleicher Dicke.

Bei diesen Stäben, deren Dimensionsverhältniss $\alpha > {}^1/_{10}$ war, war zwar einmal der permanente Magnetismus $P_f = 0$; anomale Magnetismen zeigten sich aber nicht.

$(P_a - P_f) / P_a$ ist bei einzelnen Drähten annähernd umgekehrt proportional dem Dimensionsverhältniss.

Mit wachsender Zahl z der Drähte in einem Bündel nimmt $P_a - P_f$ zu, bei dünneren Drähten erst schneller, dann langsamer als z; bei dickeren Drähten ist das schnellere Wachsen nicht zu beobachten. $P_a - P_f$ wächst ferner schneller als P_a mit wachsender Zahl der Drähte.

4) Mit wachsender magnetisirender Kraft I wächst der Unterschied des temporären Momentes $T_f - T_a$ bis zu einem Maximum und nimmt dann zuweilen wieder ein wenig ab. Dies zeigt sich noch deutlicher bei dem Verhältniss $(T_f - T_a)/(T_a)$. — Die Differenz der verschwindenden Momente V nähert sich mit wachsender Kraft einem Maximum, ohne wieder zu sinken; das Verhältniss $(V_f - V_a) / V_a$ steigt zu einem Maximum und sinkt dann wieder.

5) Mit wachsender Kraft I wächst bei Stahlstäben $P_a - P_f$ continuirlich, wenn zugleich P_a wächst, erst rascher als I, später I proportional. — Bei Eisenstäben wächst $P_a - P_f$ bis zu gewissen Werthen von I erst I proportional, erreicht ein Maximum, nimmt ab und dann wieder zu. — Bei Eisendrahtbündeln erreicht $P_a - P_f$ schon bei kleinen Kräften ein Maximum, fällt auf ein Minimum, steigt zu einem zweiten hohen Maximum und nimmt bei weniger gestreckten Drahtbündeln wieder ab.

6) Wird ein Stab durch wiederholte Einwirkung der gleichen magnetisirenden Kraft temporär bis zur Sättigung magnetisirt, während er in der Spirale dauernd verbleibt und dann, indem der Strom erst nach Entfernung des Stabes geschlossen und geöffnet wird, umgekehrt, so ist der temporäre Magnetismus bei der n ten Magnetisirung $T_{f(n)}$ grösser, wenn er nach der $n - 1$ ten temporären Magnetisirung $T_{a(n-1)}$, als wenn er nach $T_{f(n-1)}$ folgt.

Bei der Beobachtung von $T_{a(n)}$ nach $T_{a(n-1)}$ oder $T_{f(n-1)}$ war dagegen ein Unterschied nicht zu bemerken.

Ebenso ist die permanente Magnetisirung $P_{f(n)}$ grösser nach $P_{f(n-1)}$ als nach $P_{a(n-1)}$.

7) Hat der Körper zuerst eine gleiche, nahe der Sättigung entsprechende permanente Magnetisirung P_a erhalten, und wirken nun aufsteigende magnetisirende Kräfte I auf ihn, während er in der Spirale liegt, so wächst bei Stahlstäben mit zunehmendem I die Differenz $P_a - P_f$ continuirlich, bei mittleren Kräften proportional I, bei grösseren langsamer, bei kleinen Kräften scheint ein Maximum vorzukommen. — Bei Eisenstäben zeigt sich ein variables Verhalten.

Bei Drahtbündeln wächst $P_a - P_f$ mit wachsender Kraft bis zu einem grossen Maximum, sinkt schnell bis zu einem bisweilen negativen Minimum, steigt wieder zu einem Maximum und nimmt wieder ab. Die letztere Abnahme zeigt sich nur bei sehr gestreckten Bündeln nicht; sonst ist der Gang von der Dicke der Drähte und dem Dimensionsverhältniss unabhängig, auch ist es bei einem einzelnen Draht dasselbe.

Wächst P_a, so wächst bei der gleichen Kraft $P_a - P_f$ und nimmt dann wieder ab. Die letztere Periode trat bei einem Eisenstabe um so früher ein, je grösser die Kraft war, bis endlich nur noch eine Abnahme stattfand. Bei anderen Körpern überwog jedoch für alle Kräfte die Zunahme, und es war dann bei dem grössten P_a die Differenz $P_a - P_f$ stets grösser als bei der ersten Magnetisirung. Der verschwindende Magnetismus nahm bei dem obigen Eisenstabe mit wachsendem P_a ab.

Wirkt der Impuls der kleineren Kraft wiederholt, so wird das Moment P_f noch kleiner; nur wenn die Kraft nahe an der, welche P_a erzeugte, liegt, erhöhten die ferneren Impulse p_n das permanente Moment wieder etwas.

8) Eine den Kern umgebende geschlossene Metallhülle übt auf die Erscheinungen bei der Oeffnung einen grösseren Einfluss, als auf die bei der Schliessung, da ohnehin schon bei letzterer die Extraströme in der Spirale eine geschlossene Bahn vorfinden. 341

Dabei ist die Differenz der temporären Magnetismen $T_f - T_a$ bei kleineren magnetisirenden Kräften sehr klein, bei grösseren aber wird sie bedeutend.

Bei längeren Stäben ist hierbei die Differenz ebenso oft positiv, wie negativ; bei kürzeren ($^3/_4$ und $^1/_4$ eines 199 mm langen Stabes) nur positiv. Mit wachsender Kraft nimmt dieselbe bis zu einem Maximum zu und dann ab und zwar deutlicher, als ohne Röhre.

Für den permanenten Magnetismus ist bei längen Stahlstäben und Drahtbündeln von Eisen und Stahl bei Gegenwart der Metallhülle bei kleineren Kräften $P_f > P_a$, bei grösseren ist dagegen $P_a - P_f$ positiv; bei dickeren Eisenstäben bleibt $P_a > P_f$. Bei wachsender Kraft ist der Einfluss des Dimensionsverhältnisses derselbe, wie ohne Röhre.

9) Wird vor der Magnetisirungsspirale nach dem Durchgang des Stromes ein kurzer dicker Kupferdraht als Parallelschliessung eingefügt und dann erst die Säule entfernt, so dass der Extrastrom eine leitende Bahn vorfindet, so ist die permanente Magnetisirung P_n bedeutend grösser, als beim Schliessen und Oeffnen des Stromes in der Spirale nach Entfernung des Kernes (P_a). Bei einem Stahlstabe war diese Vermehrung nur klein, bei einem Eisenstab blieb P_n unter P_a, aber über P_f. 342

So war z. B.

	Eisendrähte	Stahlstab	Eisenstab
P_a	186	765	146
P_f	145	744,4	97,2
P_n	194	768	128,6

Mit wachsender magnetisirender Kraft bleibt für Stahl P_a nahe gleich P_n. Bei einem Eisenstab ist der Gang der gleiche, wie ohne Nebenschliessung, nur tritt das Maximum später ein. Bei Drahtbündeln und einem langen Eisendraht wächst auch erst $P_a - P_n$ wie ohne Nebenschliessung, nimmt dann ab, wieder zu und wieder ab; nur wird die Periode der ersten Abnahme grösser und öfter $P_n > P_a$.

Umgiebt die Magnetisirungsspirale eine geschlossene Inductionsspirale, so wirkt sie auf P_f wie eine Nebenleitung.

10) Werden die Eisendrahtbündel von Quecksilber umgeben und dadurch leitend verbunden, so geben dieselben für kleinere und mittlere Kräfte kleinere, für grosse Kräfte grössere Werthe von $P_a - P_f$, als wenn die Drähte von einander isolirt sind. Die zwei Maxima und das Minimum verschwinden dabei ganz, so dass sie nicht von Inductionsströmen in den Drähten herrühren; im Gegentheil werden sie durch die bessere Leitung derselben aufgehoben.

11) Bei Unterbrechung des magnetisirenden Stromes an Kupfer ist $P_a - P_f$ etwa um 2 bis 3 Proc. grösser, als an Quecksilber. Schnelles und langsames Hinausziehen des Leitungsdrahtes aus dem Quecksilber wirkt nicht verschieden.

Die Zeitdauer der Schliessung hat keinen wesentlichen Einfluss.

343 Erschüttert man einen Stab, welcher die permanenten Momente P_a oder P_f erhalten hat, so vermindern sich dieselben auf einen Werth P_{ea} oder P_{ef}. In beiden Fällen nehmen bei gleichen Erschütterungen (durch Herabfallen des horizontal gehaltenen Stabes von gleicher Höhe) die Werthe $(P_a - P_{ea})$ und $(P_f - P_{ef})$ mit wachsendem P_a oder P_f zu.

Ist das permanente Moment vorher durch einen Gegenstrom auf P_c vermindert, so nimmt $P_c - P_e$ mit abnehmendem P_c ab und zwar viel stärker, als der Abnahme des ursprünglichen Momentes P_a durch den Gegenstrom entspricht.

Dabei wird das Moment P_a durch gleich starke Erschütterungen viel stärker reducirt, als ein gleich grosses Moment P_f, gleich viel, ob vor P_f schon ein grösseres Moment P_a bestanden hat, oder auch P_f das grösste bisher erzeugte Moment ist.

Ferner ist die Reduction eines P_f nicht verschieden, mag es vor P_a und grösser als jedes vorherige P_a bestanden haben, oder mag es nach P_a aus letzterem gebildet sein.

Ist $P_f = P_c = P_e$, so steigert eine kleinere im Sinne der ersten Kraft wirkende Kraft p auch bei wiederholter Wirkung das Moment im ersten Falle weniger, als in den beiden letzteren.

Ueber die Ursachen des verschiedenen Verhaltens der temporären und permanenten Magnetisirung beim Verweilen und beim Herausziehen der Eisen- und Stahlkerne aus der Magnetisirungsspirale während der Aenderungen des Stromes, so wie über die anomale Magnetisirung der dickeren Kerne im ersten Falle sind zwei Ansichten aufgestellt worden. A. v. Waltenhofen nahm zur Erklärung der anomalen Magnetisirung an, dass beim schnelleren Oeffnen des magnetisirenden Stromes die durch denselben gerichteten Molecüle bei der schnellen Rückschwingung gegen ihre unmagnetischen Gleichgewichtslagen auch über dieselben hinaus schwingen und dann eine entgegengesetzte Ablenkung bewahren könnten.

Sodann kann man nach meiner Meinung die beim Schliessen und Oeffnen in der Magnetisirungsspirale und den Kernen selbst entstehenden Inductionsströme als maassgebend ansehen.

In Folge seiner Versuche hält indess Fromme letzteren Grund nicht für entscheidend und sucht wie v. Waltenhofen in den schnellen Oscillationen der magnetischen Molecüle bei schnellen Stromänderungen die Ursache der Erscheinungen. Wenn nun auch die Möglichkeit vorliegt, dass derartige Schwingungen eintreten, so sind meines Erachtens doch die vorliegenden Versuche noch nicht genügend, dieselben zu beweisen, sondern die Erscheinungen lassen sich noch durch die Inductionsströme erklären.

Wir betrachten zuerst das Verhalten der permanenten Momente beim Oeffnen des Stromes.

Wird der Kreis einer Magnetisirungsspirale plötzlich geöffnet, so entsteht in ihm ein Extrastrom, der noch durch die Abnahme des Momentes des Magnets in ihr verstärkt wird. An den Elektroden der Unterbrechungsstelle sammeln sich freie Elektricitäten mit grosser Dichtigkeit an, welche sich zum Theil in Funken, zum Theil aber auch durch die Spirale rückwärts ausgleichen und event. zu weiteren Oscillationen Veranlassung geben können. Da nun schwächere magnetisirende Kräfte den durch eine stärkere Kraft erzeugten permanenten Magnetismus eines Kernes sehr bedeutend vermindern, ja sogar umkehren können, so kann dies auch durch die rücklaufenden Ströme in der Magnetisirungsspirale geschehen und so die permanente Magnetisirung $P_f < P_a$ werden[1]). Hierbei brauchen zunächst noch keine Inductionsströme in der Masse des Kernes mitzuwirken.

Wenn also auch Bündel von ganz dünnen Drähten anomale Magnetisirungen zeigen, so ist dies noch kein Beweis dafür, dass dieselben nicht auch in diesem Falle durch die Inductionsströme hervorgerufen sein können.

---

[1]) Wir wollen hierbei davon abstrahiren, dass beim Einschieben und Ausziehen eines Stabes aus einer Spirale sein eines Ende beim Durchgang durch die mittleren Theile der Spirale einer stärkeren magnetischen Kraft ausgesetzt wird, als wenn er in der Spirale festliegt. — Ueberhaupt können hier die Gesichtspunkte nur kurz angedeutet werden.

Da sich das permanente Moment von (dickeren) Stäben von relativ kleinerem Dimensionsverhältniss leichter umkehren lässt, indem die die Theilchen in ihren magnetischen Lagen erhaltenden Wechselwirkungen kleiner sind, so können auch zunächst aus diesem Grunde dickere Stäbe leichter die anomale Magnetisirung zeigen.

Dasselbe kann von dem Verhalten massiver Stäbe und Drahtbündel gelten.

Bei härteren und längeren Stäben ist die gegenseitige Richtkraft der Theilchen stärker, die Schwächung des permanenten Momentes durch die Rückströme ist kleiner, P_f und P_a sind weniger von einander verschieden.

Da ferner die zur Entmagnetisirung um einen bestimmten Theil erforderlichen Gegenströme durchaus nicht proportional den magnetisirenden Strömen sind, so können in Folge von abwechselnd gerichteten Strömen Maxima und Minima der Differenz $P_a - P_f$ bei wachsenden magnetisirenden Kräften auftreten.

Liegen um den Kern geschlossene Metallhüllen, so werden in ihnen beim Verschwinden des ursprünglichen Stromes gleichgerichtete Ströme inducirt und nachher Ströme, welche dem entstehenden Gegenstrom entgegengerichtet sind. Diese Ströme wirken aber letzterem entgegen, so dass der Unterschied $P_a - P_f$ kleiner wird. Auch in den massiven Eisen- und Stahlkernen selbst können solche Inductionsströme entstehen und die Verhältnisse noch weiter compliciren.

Wird dem Oeffnungsinductionsstrom eine geschlossene Bahn durch eine Nebenleitung geboten, so treten nicht nur keine Rückströme auf, sondern der Oeffnungsinductionstrom verstärkt sogar im letzten Moment den magnetisirenden Strom, wodurch das permanente Moment P_f sogar über P_a steigen kann. Auch hier können der Stoff, das Dimensionsverhältniss und die etwa im Kerne selbst inducirten Ströme die Erscheinungen modificiren.

Da endlich durch die Rückströme das Moment P_f verkleinert ist, so vermindert es sich durch Erschütterungen weniger, als P_a.

Dass das temporäre Moment beim Schliessen $T_f > T_a$ ist, kann von der schnelleren Einstellung der Molecüle bei Stromschluss während des Verweilens des Stabes in der Spirale herrühren, wodurch ähnlich wie durch wiederholte Stromeswirkung (analog dem Verhalten bei der Torsion von Drähten) die Reibung der Molecüle an einander stärker vermindert wird und sie mehr dem Zuge der magnetisirenden Kraft folgen.

Endlich ist zu beachten, dass jedenfalls die etwaigen Oscillationen der Molecüle um ihre Gleichgewichtslage in viel kürzerer Zeit erfolgen, als die ist, in der die Inductionsströme ablaufen, so dass letztere sicher viel längere Zeit die Einstellung derselben beeinflussen.

345 Aehnliche Verhältnisse ergeben sich bei der Magnetisirung von Stahlnadeln durch den Strom in geschlossenen oder geöffneten Induc-

tionsspiralen, in welchen letzteren ebenfalls oscillatorische Elektricitätsbewegungen eintreten.

Deutlich zeigt sich dieses Verhältniss bei Versuchen von J. J. Thomson[1]).

Zwei 300 Yards lange Drähte, von denen der zweite in drei Abtheilungen *AB*, *CD*, *EF* von 100 Yards getheilt war, waren neben einander aufgewunden; der erste diente als inducirender, die Abtheilungen des letzteren als inducirter Draht. In ihren Kreis war eine kleine Magnetisirungsspirale *S* mit einer Nähnadel eingefügt. Der inducirte Kreis blieb geöffnet. Nach sechsmaligem Oeffnen des eine Grove'sche Säule enthaltenden primären Kreises wurde die Nadel untersucht. Es war dabei gleichgültig, ob dieselbe während des Schliessens des Stromes in der Magnetisirungsspirale lag oder erst nachher eingeschoben wurde. Waren alle secundären Spiralen hinter einander geordnet, so wurde die Nadel nicht magnetisirt, wo sie auch eingefügt war. War die Anordnung der Spiralen hinter einander *AB*-*S*-*DC*-*EF*, so erhielt die Nadel bei geöffneter Schliessung zuweilen mehr, zuweilen weniger Magnetismus, als bei geschlossener. War die Anordnung *AB*-*DC*-*EF*-*S*, so dass die Magnetisirungsspirale am freien Ende war, so war die Magnetisirung sehr schwach, waren die Enden mit einem Condensator verbunden, so war sie bedeutend.

Bei der Induction nimmt das Potential im secundären Kreise beim Fortschreiten in derselben Richtung zu. Bei der Anordnung *AB*-*CD*-*EF* differiren die Potentiale zweier auf einander folgender Windungen nur um sehr wenig; bei der Anordnung *AB*-*DC*-*EF* liegen dagegen Windungen von sehr verschiedenem Potential neben einander, wie bei einem Condensator von grosser Capacität. Die inducirten Elektricitäten sammeln sich an solchen Stellen grosser elektrostatischer Capacität unregelmässig an, und elektrische Oscillationen entstehen, welche an verschiedenen Stellen verschieden intensiv sein können, wie man an der verschiedenen Magnetisirung der Nadel in den einzelnen Inductionsspiralen und an ihren freien Enden sieht.

Zu diesen Versuchen genügen auch schon zwei Inductionsspiralen.

Werden die Unterbrechungsstellen des primären Kreises mit einem Condensator verbunden, so wird bei einem geschlossenen Inductionskreis die magnetisirende Wirkung des Inductionsstromes schwach vermehrt[2]), bei einem geöffneten dagegen geschwächt. Werden auch die freien Enden des inducirten Kreises mit einem Condensator verbunden, so ist der Einfluss geringer.

Ist eine der inducirten Spiralen (*EF*) in sich geschlossen, und werden die anderen mit einander und der Magnetisirungsspirale verbunden, während ihre Enden frei sind, so wird dadurch die Magnetisirung

---

[1]) J. J. Thomson, Phil. Mag. [5] 12, p. 49, 1881*; Beibl. 5, p. 692*. — [2]) Strutt, Phil. Mag. Juni 1870*.

geschwächt. Sind die Enden der Spirale EF mit einem Condensator verbunden, so wird sie im Gegentheil verstärkt.

In Betreff der Berechnung dieser Erscheinungen mit Hülfe der Gleichungen von Maxwell müssen wir auf die Originalarbeit verweisen.

Anhang.

Telephon.

346 Auf den Inductionsströmen, welche durch periodische Aenderungen des Magnetismus eines Magnets erzeugt werden, beruht die Wirkung des im Jahre 1875 construirten Telephons von Graham Bell, abweichend von dem schon 1860 von Reiss construirten Telephon, Bd. III, §. 846, in welchem die Zeichengebung durch Stromunterbrechung erfolgt. Die einfache Grundform dieses Telephons ist die folgende, Figur 77. Vor einem durch eine Schraube E zu verstellenden Magnetstab NS ist in einem Holzgehäuse AB eine ihm conaxiale dünne Eisenplatte P an ihren Rändern befestigt, gegen welche auf der dem Magnet abgekehrten Seite ein Schallbecher M gerichtet ist. Wird in denselben ein Ton, ein Wort hineingesungen oder gesprochen, so wird synchron zu den dabei erfolgenden, die Platte den Magnet nähernden und von ihm entfernenden Schwingungen derselben der Magnetismus des Magnets abwechselnd verstärkt oder geschwächt. Um den Magnet ist nahe der Eisenplatte eine Spirale D gewunden, in welcher ganz entsprechend diesen Aenderungen des Magnetismus Ströme inducirt werden. Leitet man

Fig. 77.

dieselben mittelst der Drähte ae und bd und der daran befestigten Klemmen zu der Spirale eines ganz gleichen zeichenempfangenden Telephons, so wird in demselben wiederum entsprechend der Magnetismus des Magnets geändert, synchron dazu die darüber befindliche Eisenplatte in Schwingungen versetzt, welche man hört, wenn man das Ohr vor den Schallbecher vor derselben hält.

347

Es liegt ganz ausserhalb dieses Werkes, die dem technischen Gebiet angehörenden mannigfachen Constructionen und Anwendungen des Telephons zu besprechen. Wir wollen deshalb nur ganz kurz einige wenige der gebräuchlichsten Abänderungen desselben erwähnen, welche zu physikalischen Zwecken dienen können und bei welchen durch verschiedene Vorrichtungen die Schallstärke der übertragenen Töne vermehrt werden soll[1]).

Fig. 78.

So verwendet z. B. Righi statt der Eisenmembran eine Lamelle von Pergamentpapier, in deren Mitte eine Eisenblechplatte befestigt ist (siehe weiter unten).

Bei dem Telephon von Siemens, Fig. 78, wird der gerade Magnet durch einen Hufeisenmagnet ersetzt, auf dessen Enden gebogene und mit Spiralen umwundene Eisenschuhe geschraubt sind, welche ihre Enden der Eisenplatte zukehren. Eine auf die Mundöffnung aufzuschraubende Pfeife dient zum Rufen.

Im Telephon Gower, Fig. 79, ist der bis zu 5 kg tragende hufeisenförmige Magnet in einer zur Eisenplatte parallelen Ebene gebogen und trägt ebenfalls der Platte gegenüber mit sehr langen Spiralen von sehr feinem Draht umwickelte Schuhe.

Das Telephon Ader, Fig. 80, hat einen ringförmig gebogenen Magnet A mit zwei mit Spiralen B umgebenen Eisenschuhen, vor welchen eine dünne Eisenplatte M am Rande befestigt ist. Ueber derselben befindet sich ein in der Mitte durchbohrter dickerer Ring x von weichem

[1]) Einen Ueberblick über dieses Gebiet erhält man in: „Le Téléphone par le comte du Moncel, 4. édition (Bibliothèque des Merveilles), Paris, Hachette 1882", sowie in Schwartze, Telephon, Mikrophon und Radiophon. Wien, Hartleben, 1883".

Eisen und darüber das Mundstück *E*. Durch den Eisenring wird der Magnetismus des Magnets an seinen Polen verstärkt, und demgemäss

Fig. 79.

verändert sich derselbe auch bei jeder Aenderung der Lage der vibrirenden Eisenplatte stärker, und stärkere Inductionsströme werden erzeugt.

348 Häufig verwendet man als zeichengebenden Apparat auch ein Mikrophon, ähnlich wie der Zeichengeber von Reiss, oder bestehend nach Edison aus einer Kohlenplatte (mit Petroleum angemachtem und ausgeglühtem Kienruss), welche zwischen zwei Platinplatten gelegt ist, deren eine fest, deren andere an einer unter einem Schallbecher angebrachten vibrirenden Lamelle befestigt ist, nach Righi aus einer an einer Feder befestigten, mit Graphit gefüllten Schale, auf welche eine an der vibrirenden Lamelle angebrachte Metallplatte drückt u. s. f. Hierbei muss durch den zeichengebenden und empfangenden Apparat ein Strom geleitet werden, dessen Intensität bei den Schwingungen der Lamelle des mikrophonischen Zeichengebers verändert wird.

Fig. 80.

349 Häufig wird auch nach dem Vorgang von Elisha Gray und Edison durch einen solchen Zeichengeber der primäre Strom eines Inductoriums unterbrochen und der Inductionsstrom desselben zum Empfänger

geleitet. Der Vortheil hierbei ist einmal, dass bei der grossen Länge und dem grossen Widerstand, welchen man den Inductionsrollen geben kann, die elektromotorische Kraft steigt und ein grosser Widerstand ausserhalb eingefügt werden kann, dann auch, dass die Inductionsströme im Allgemeinen schneller verlaufen, und somit die Bewegungen der Eisenplatte präciser werden.

Die in dem zeichengebenden Telephon erregten Inductionsströme kann man direct nachweisen, indem man sie durch ein empfindliches Elektrodynamometer oder ein Froschpräparat leitet. Die bewegliche Rolle des ersteren wird dadurch abgelenkt, das zweite tetanisirt [1]). 350

Die Telephonströme wirken dagegen bei gleichmässigen Erregungen des Telephons durch eine Stimmgabel, eine Pfeife oder die Stimme nicht auf das Galvanometer, da sie aus zwei gleichen und entgegengesetzten Theilen bestehen. Aendert man aber die Tonstärke, so zeigt sich, je nach der Zunahme oder Abnahme derselben, ein Ausschlag nach der einen oder anderen Seite; so z. B. auch bei einer Detonation, einem Schlage auf die vibrirende Platte [2]).

Diese Ausschläge rühren von ungleichen Elongationen der Platte nach beiden Seiten her, wenn mit wachsender und abnehmender Tonstärke die Schwingungsweiten zu- oder abnehmen.

Leitet man die Ströme des Telephons durch eine Quecksilbersäule, welche in einem Capillarrohre beiderseits durch verdünnte Schwefelsäure begrenzt ist, z. B. durch ein Capillarelektrometer, so erhält man fast stets eine Bewegung des Quecksilbers [3]). Da beide Contactflächen des letzteren mit der Säure meist ungleich oxydirt sind, so ist gewöhnlich schon ein Impuls zur Bewegung vorhanden, indess ist derselbe meist zu schwach, um die Bewegungshindernisse zu überwinden. Beim Durchleiten der alternirenden Inductionsströme des Telephons addirt sich hierzu die Wirkung der letzteren in einem Sinne, so dass sie die wirkliche Bewegung vermitteln, während die Impulse im anderen Sinne noch mehr geschwächt werden [4]).

Die zur Tonerzeugung im Telephon erforderlichen Ströme brauchen nur äusserst schwach zu sein; so kann es nach Warren de la Rue [5]) schon durch den Strom eines Daniell'schen Elementes bei einem Widerstande der Schliessung von 100 Megohm (10 Millionen Kilometer Telegraphendraht von 4 mm Dicke), also durch einen Strom von $1,116 . 10^{-9}$ Ampères tönen. Auch nach Brough [6]) genügt dazu ein Strom von 10^{-9} Ampères. 351

---

[1]) E. du Bois-Reymond, Verh. der Berl. physiol. Ges. 30. Nov. 1877*; Beibl. 2, p. 50*. — [2]) de Chardonnet, Compt. rend. 94, p. 857, 1882*; Beibl. 6, p. 401*. — [3]) Page, Nature, 17, p. 285*; Beibl. 2, p. 295*. — [4]) R. Sabine, Nature, 17, p. 379*; Beibl. 2, p. 295*. — [5]) Warren de la Rue, Telegr. Journ. 1879, p. 97*; Beibl. 3, p. 47*. — [6]) Brough, ibid.

352 Auf anderem Wege gelangt Pellat[1]) zu ebenso kleinen Werthen. Ein Condensator von $^1/_3$ Mikrofarad Capacität wurde 160 mal in der Secunde durch Verbindung mit zwei Punkten eines Stromkreises geladen und durch eine ein Telephon enthaltende Schliessung entladen. Ist C die Capacität, V die Potentialdifferenz der Belegungen, so ist die bei n Ladungen und Entladungen ausgegebene Energie $n\,C\,V^2$. Wird V bis auf 0,0005 Volts reducirt, so hört man immer noch einen Ton im Telephon, obgleich die Energie so klein ist, dass sie erst in 10000 Jahren eine kleine Calorie (1 g Wasser 1° C.) erzeugen könnte. Mit dieser kleinen Wärmemenge könnte man also während 10000 Jahren das Telephon zum Tönen bringen.

Dass dabei die Tonstärke im Telephon nur von der aus dem Condensator entladenen Elektricitätsmenge, nicht von seiner Capacität abhängt, folgt schon daraus, dass auch die Intensität des Entladungsstromes nur durch erstere bedingt ist[2]).

Wird die Inductionsspirale des du Bois'schen Schlittenapparates bis zu 15 mal so weit von der inducirenden entfernt, wie wenn ein Froschschenkel gerade noch auf die Ströme in ersterer reagirt, so hört man dieselben doch noch deutlich im Telephon; letzteres ist also 200 mal empfindlicher als der Froschschenkel[3]).

353 Ferraris[4]) findet, dass die zur Anregung des Telephons erforderliche Stromintensität mit der Höhe des Tones schnell abnimmt, so dass sie innerhalb gewisser Grenzen dem Quadrat der Schwingungsdauer proportional ist. Die Versuche wurden angestellt, indem ein durch einen Wagner'schen Hammer unterbrochener Strom durch eine Drahtleitung geführt wurde, und zwei mehr oder weniger von einander entfernte Punkte derselben mit einem Telephon verbunden und der Abstand zwischen ihnen so weit verkürzt wurde, bis gerade der Ton verschwand. So ist z. B., wenn $z = 1/T$ die Zahl der Schwingungen, i die Intensität in Ampères ist, im C.-G.-S.-System:

	c_3	f_3	a_3	c_4	d_4
z	264	352	440	523	594
$10^{12}i$	2306	1704	965	656	531
$10^6 z^2 i$	161	211	187	183	187

[1]) Pellat, Bullet. Soc. Phil. [7] 4, p. 94, 1881*; J. de Phys. 10, p. 358, 1881*; Beibl. 5, p. 624, 876*. — [2]) Wietlissbach, Berliner Monatsber. 1879, p. 278*; Beibl. 3, p. 651*. — [3]) d'Arsonval, Compt. rend. 86, p. 832, 1878*; Beibl. 2, p. 725*. — [4]) Ferraris, Atti di Torino, 13, 1878*; Beibl. 3, p. 43*. Siehe daselbst andere Versuche und eine Berechnung, wonach mit wachsender Tonhöhe in Folge der Extraströme das Potential einer in den Kreis eines zeichengebenden Telephons eingeschalteten Spirale auf eine in den des zeichenempfangenden Telephons eingefügte Spirale im Verhältniss zur Schwingungsdauer der Platte des ersteren Telephons steigt und sich so das Verhältniss der einzelnen Töne des gegebenen Klanges zu dem im empfangenen Klange ändert, mithin letzterer ebenfalls ändert.

Die von Ferraris für den Ton a_3 gefundene Stromstärke stimmt mit den von W. de la Rue beobachteten gut überein.

354 Die Amplitude der Schwingungen des Diaphragmas (für stärkere Ströme durch ein Mikroskop an einer auf dem Diaphragma befestigten Schweinsborste beobachtet) beträgt nach Bosscha[1]) für die schwächsten, noch einen Ton gebenden Ströme nur etwa $^1/_{200}$ der Wellenlänge des gelben Lichts (zwischen 1,3 bis $2{,}9 . 10^{-6}$ mm).

Auch Salet[2]) hat diesen Werth bestimmt. Er befestigt auf der Eisenplatte des Telephons eine kleine Glasplatte und vor derselben eine zweite, so dass zwischen beiden Newton'sche Ringe entstehen. Dann lässt er das Telephon einen continuirlichen Ton ausgeben und stellt vor dasselbe eine mit Spalten versehene rotirende Scheibe auf; für eine gewisse Rotationsgeschwindigkeit, die dem Ton entspricht, welchen die Scheibe, als Sirene benutzt, geben würde, erscheinen die Ringe deutlich. Erhöht oder vertieft man allmählich den Ton, so oscilliren die Ringe, erst langsam und dann sehr schnell. Während der Oscillation kann man die Verschiebung der Ringe bestimmen; dieselbe entspricht etwa einer Wellenlänge, die Oscillationsweite beträgt also etwa 2 bis 3 Zehntausendtel Millimeter.

355 Die Ströme im Telephon entstehen, wie wir angegeben haben, wesentlich durch die Veränderung des magnetischen Momentes des Magnetes durch die darin oscillirende Eisenplatte. Zum sehr kleinen Theil können sie auch dadurch hervorgerufen werden, dass in Folge der veränderten Anziehung des Magnets durch dieselbe seine Länge sich verändert. In der That können schon ohne Anwendung eines Diaphragmas oder mit einem solchen aus Pergamentpapier[3]) Ströme entstehen, wo dann allein die kleinen Erschütterungen, welche der Zahl der Schwingungen der hineingerufenen Töne entsprechen, das Moment des Magnets ändern. Jedenfalls sind aber letztere Wirkungen sehr gering.

Auch im zeichenempfangenden Telephon kann sowohl und überwiegend durch Veränderung des Momentes des Magnets in Folge der ihn umkreisenden Ströme, als auch in sehr viel geringerem Maasse durch die Längenveränderung des Magnets die Eisenplatte ungleich angezogen werden und zum Tönen kommen[4]).

356 Schwingt die Eisenplatte des Zeichengebers, so kann man mit E. du Bois-Reymond[5]) annehmen, dass das Potential P der Platte und des

[1]) Bosscha, Arch. néerl. 1878*; Beibl. 2, p. 513*. — [2]) Salet, Compt. rend. 95, p. 178, 1882*; Beibl. 7, p. 54*. — [3]) Spottiswoode, Telegr. Journ. 1878, p. 76*; siehe auch du Moncel, Compt. rend. 86, p. 557, 1878*; Beibl. 2, p. 293*. — [4]) Siehe auch hierüber Sylvanus Thompson, Phil. Mag. [5] 8, p. 129, 1879*; Beibl. 3, p. 818*. — [5]) E. du Bois-Reymond, Verhandl. der physiol. Ges. zu Berlin, 30. Nov. 1877*; Zusatz, Arch. für Physiol. 1877, p. 562*; Beibl. 2, p. 50, 296*.

Magnets auf die darüber liegende Inductionsspirale durch die Formel: $P = const\, \Sigma\, sin\, t$ dargestellt wird, wo t die Zeit ist. Die daraus resultirende Intensität der Inductionsströme, und demgemäss die Schwingungen der Eisenmembran und angrenzenden Luftschicht des Zeichenempfängers folgt also zunächst ohne Berücksichtigung der Selbstinduction der Spirale der Gleichung $dP/dt = const\, cos\, t$, ist daher durch eine Cosinusoide dargestellt, die einer um eine Viertelschwingungsdauer verschobenen Sinusoide entspricht. Die Summation der allen Sinusoiden entsprechenden Cosinusoiden liefert indess eine etwas andere Gestalt der Curve für die Schwingungen der Luft des Empfängers, als die des Zeichengebers.

357 Dass die Phasendifferenz der Töne im zeichengebenden und zeichenempfangenden Telephon etwa eine Viertelschwingung beträgt, hat S. P. Thompson[1]) nachgewiesen, indem er beide an 1 m langen Drähten aufhängt, so dass sie gleich schnell als Pendel schwingen. Unter der Ruhelage jedes Telephons ist in der Schwingungsebene ein Stahlmagnet angebracht. Wird eines dieser Telephone in Schwingungen versetzt, so beginnt auch das andere in Folge der inducirten Ströme zu schwingen. Die Phasendifferenz zwischen beiden beträgt stets ein Viertel der Schwingungsdauer. Dasselbe geschieht bei jeder Uebertragung des Tons durch Induction.

358 Die gegen obige Erklärungen gemachten Einwände, dass danach die Intensitätsverhältnisse der Schwingungscurve des Zeichenempfängers ganz andere sein würden, als die des Zeichengebers[2]), haben fast gleichzeitig Helmholtz[3]) und Fr. Weber[4]) widerlegt, indem sie nachwiesen, dass dabei die Selbstinduction der Spiralen auf einander berücksichtigt werden muss. Sie zeigen zugleich, dass aus denselben Gründen die Klangfarbe ungeändert bleibt, wenn das zeichenempfangende Telephon in einen neben dem Schliessungskreise des zeichengebenden Telephons liegenden inducirten Kreis eingeschaltet ist[5]).

Es seien zwei benachbarte geschlossene Kreise gegeben, in welche je ein Telephon T und T_1 eingefügt ist, und die stark inducirend auf einander wirken. Ist in dem das Telephon T enthaltenden Kreise der Widerstand W, die Intensität des Stromes I, das Potential des Kreises auf sich selbst Q, das Potential der magnetischen Massen des Telephons T auf den Kreis P; sind W_1, I_1, Q_1 dieselben Werthe für den zweiten das Telephon T_1 enthaltenden Kreis, R das Potential beider Kreise auf einander, so ist nach den Inductionsgesetzen:

---

[1]) S. P. Thompson, Nature, 20, p. 446, 1880*; Beibl. 4, p. 295*. — [2]) L. Hermann, Pflüger's Archiv, 16, p. 264, 1877*; Beibl. 2, p. 166*. — [3]) H. Helmholtz, Wied. Ann. 5, p. 448, 1878*. — [4]) Fr. Weber, Züricher Vierteljahrschrift 1. Juli 1878*; Arch. de Genève [3] 1, p. 102, 1879*; Beibl. 3, p. 291*. — [5]) Wir folgen hier der für einen kurzen Auszug geeigneten, übrigens zum gleichen Ziele führenden Darstellung von Fr. Weber.

$$\left.\begin{aligned} I W &= \frac{dP}{dt} - Q\frac{dI}{dt} - R\frac{dI_1}{dt} \\ I_1 W_1 &= - Q_1\frac{dI_1}{dt} - R\frac{dI}{dt} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

Das elektromagnetische Potential P lässt sich schreiben:

$$P = P_0 + A \sin 2\pi n t$$

und die Gleichungen:

$$I = C \sin(2\pi n t + \alpha), \qquad I_1 = C_1 \sin(2\pi n t + \alpha_1)$$

genügen den Gleichungen 1), wenn die Amplituden sind:

$$C = \frac{A}{Q}\sqrt{\frac{1 + \left(\frac{W_1}{2\pi n Q_1}\right)^2}{\left(\frac{W}{2\pi n Q} + \frac{W_1}{2\pi n Q_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{R^2}{Q Q_1} - \frac{W W_1}{(2\pi n)^2 Q Q_1}\right)^2}}$$

$$C_1 = -\frac{A R}{Q Q_1}\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{W}{2n\pi Q} + \frac{W_1}{2n\pi Q_1}\right)^2 + \left(1 - \frac{R^2}{Q Q_1} - \frac{W W_1}{(2n\pi)^2 Q Q_1}\right)^2}}.$$

Die Phasen werden ausgedrückt durch:

$$tg\,\alpha = \frac{\left[1 + \left(\frac{W_1}{2\pi n Q_1}\right)^2\right]\frac{W}{2\pi n} + \frac{R^2 . W_1}{Q_1^2 . 2\pi n}}{\left[1 + \left(\frac{W_1}{2\pi n Q_1}\right)^2\right] Q - \frac{R^2}{Q_1}}$$

$$tg\,\alpha_1 = \frac{\frac{W_1}{2\pi n Q_1} + \frac{W}{2\pi n Q}}{1 - \frac{R^2}{Q Q_1} - \left(\frac{W}{2\pi n Q}\right)\left(\frac{W_1}{2\pi n Q_1}\right)}.$$

Sind beide Telephone in dem gleichen Kreise, für welchen die Werthe W_0 und Q_0 gelten, so wird die Amplitude des Stromes und die Phase:

$$C_0 = \frac{A}{Q_0\sqrt{1 + \left(\frac{W_0}{2\pi n Q_0}\right)^2}}, \qquad tg\,\alpha_0 = \frac{W_0}{2\pi n Q_0}.$$

Im Allgemeinen wird also 1) die Klangfarbe des Tones bei dem Telephoniren geändert, da die Amplitude des variabeln Stromes C_1 oder C_0 von der Zahl n der Oscillationen des erregenden Potentials P, d. h. von der Zahl der Schwingungen des das Instrument erregenden Tones abhängt. 2) Die Verzögerung der Phase beim Telephoniren ändert sich mit der Natur des Stromkreises und hängt von der Zahl der Schwingungen ab. 3) In gewissen Fällen, wenn $W/2\pi n Q$ und $W_1/2n\pi Q_1$ so klein sind, dass ihre Quadrate vernachlässigt werden können, ist die Ampli-

tude C_1 oder C_0 von der Zahl n der Schwingungen unabhängig. Dann wird

$$C = \frac{A\,Q_1}{Q\,Q_1 - R^2}, \quad C_1 = \frac{-\,A\,R}{Q\,Q_1 - R^2}, \quad C_0 = \frac{A}{Q}$$

und die Phasen sind:

$$tg\,\alpha = \frac{\frac{W}{2\pi n}\,Q_1 + \frac{R_2}{Q_1}\,\frac{W_1}{2\pi n}}{Q\,Q_1 - R^2}; \quad tg\,\alpha_1 = \frac{\frac{W_1}{2\pi n}\,Q + \frac{W}{2\pi n}\,Q_1}{Q\,Q_1 - R^2};$$

$$tg\,\alpha_0 = \frac{W_0}{2\pi n\,Q_0}.$$

Die Aenderungen der Phasen sind also sehr kleine Grössen derselben Ordnung, die für $W/2\pi n\,Q = W_1/2\pi n\,Q_1 = W_0/2\pi n\,Q_0 = 0$ gleich Null werden.

Sind also die ersten der beiden letzterwähnten Grössen sehr klein, so stimmt die Erfahrung vollkommen mit den Inductionsgesetzen.

359 Das Telephon ist bei seiner grossen Empfindlichkeit als Indicator für alternirende Ströme zu verwenden.

Auch sehr schwache constante Ströme kann man dadurch erkennen, wenn man sie durch eine Stimmgabel unterbricht [1]).

So kann man das Telephon, z. B. bei Bestimmungen der Leitungswiderstände mittelst abwechselnd gerichteter Ströme, bei der Wheatstone'schen Methode benutzen. Wir haben schon Thl. I, §. 458 und Thl. II, §. 831 erwähnt, dass wenn hierbei eine Polarisation der Elektroden in einem zersetzbaren Leiter auftritt, dieselbe durch Einschaltung einer Inductionsspirale in den correspondirenden Zweig compensirt werden kann [2]). Ebenso wird das Telephon bei den Widerstandsbestimmungen mittelst der sogenannten Inductionswaage von Hughes verwendet [3]).

360 Chrystal [4]) hat zu derartigen Untersuchungen ein mit doppelten Drahtwindungen aus zwei zusammengedrillten Drähten, ähnlich wie das Differentialgalvanometer, versehenes Differentialtelephon construirt, wobei indess die Herstellung ganz gleicher Windungsreihen besondere Schwierigkeit bietet. Dieser Apparat kann zur Vergleichung von Inductionscoefficienten von Spiralpaaren dienen. Der durch eine elektromagnetische Stimmgabel unterbrochene Strom einer Säule wird neben einander durch beide Telephonzweige A und B geleitet, in welche die zu vergleichenden Spiralpaare eingeschaltet werden, so dass der Strom die zu einander gehörigen Spiralen je hinter einander durchfliesst. Sind die Widerstände

[1]) d'Arsonval, l. c. — [2]) Wietlisbach, Berl. Monatsber. 1879, p. 278*; Beibl. 3, p. 651*. — [3]) Auch Hughes, Compt. rend. 87, p. 1079, 1878, 88, p. 122, 1879*; Beibl. 3, p. 293*. Forbes, Nature, 17, p. 343, 1878*; Beibl. 2, p. 298*. — [4]) Chrystal, Proc. Edinb. Roy. Soc. 1879 u. 1880, p. 685*; Beibl. 5, p. 72*.

der Spiralpaare Q und R, die Inductionscoefficienten M und N, so hört man im Telephon keinen Ton, wenn $Q = R$ und $M = N$ ist. Die Spiralen des einen Paares sind auf einer Scala gegen einander zu verschieben, bis das Telephon nicht mehr tönt. Ihr Potential wird durch Rechnung bestimmt. Statt der Spiralenpaare können auch nur einzelne Spiralen verwendet werden, deren Induction auf sich selbst dann gleich sein muss.

Auch kann man die Capacitäten x und y zweier Condensatoren mit einander vergleichen. Man verbindet sie mit den Zweigen A und B durch Drähte von verschwindendem Widerstand, so dass sie alle Inductionsspiralen, ausser den Telephonspiralen, in sich schliessen. Ruhe tritt ein, wenn $Q = R$, $M = N$, $X = Y$ ist, wonach die Capacitäten bis $^1/_{100000}$ Mikrofarad genau bestimmt werden können. — Auch kann man den Stromzweig A in zwei Zweige theilen, deren einer den Condensator x enthält und den Widerstand Q'' besitzt. Der Widerstand des anderen sei Q', sein Selbstinductionscoefficient M'. Die Widerstände und Inductionscoefficienten des Restes von A seien Q und M, die von B resp. R und N. Dann tritt Ruhe ein, wenn $M = N$, $Q' = Q'' = R - Q$ und $M' / Q' = Q' X$. Die letzte Gleichung zeigt, dass die von der Zeit abhängigen Constanten von der Spirale $(M' Q')$ und vom Condensator $(X' Q')$ gleich sein müssen; dann wirkt der verzweigte Theil von A, wie wenn er keine Selbstinduction oder Capacität, sondern nur den Widerstand Q' hätte. Durch Rechnung und Versuche ergiebt sich hierbei, dass der Condensator bei mittlerer Capacität höhere Töne verstärkt, niedere unverändert lässt oder schwächt; bei kleinen Capacitäten alle Töne unverändert lässt, bei grossen alle in gleichem Verhältniss verstärkt.

Drittes Capitel.

Induction in körperlichen Leitern. Rotationsmagnetismus.

---

361 Wie in linearen Leitern, so werden auch in Leitern von mehreren Dimensionen Ströme inducirt, deren Richtung im Allgemeinen unter Anwendung des Lenz'schen Satzes erkannt werden kann. Einige einfachere Fälle der Art, bei welchen die Induction durch galvanische Ströme geschieht, sind schon früher von Nobili beobachtet worden. Man erhält bei denselben zugleich continuirlich andauernde Inductionsströme.

Nobili[1]) setzte einen, an dem Rande einer horizontalen Holzscheibe von 5 Zoll Durchmesser befestigten Kupferstreifen, Fig. 81, in schnelle Rotation. Auf den oberen und unteren Rand des Streifens wurden an zwei Punkten die Enden zweier zum Galvanometer führender Drähte s und s_1 (besser zwei mit denselben verbundene Federn) aufgesetzt. Befindet sich ein verticaler, in der Richtung des Pfeiles, z. B. von unten nach oben, vom Strom durchflossener Leiter AB, Fig. 81, neben dem Kupferstreifen, und rotirt letzterer in der Richtung des Pfeiles cd, so entfernen sich die gerade vor dem Leiter AB befindlichen Theile des Streifens bei ihrer Bewegung gegen die Ableitungspunkte ss_1 hin von AB. In ihnen entsteht dann bei gleichmässiger Rotationsgeschwindigkeit ein continuirlicher Inductionsstrom,

Fig. 81.

B c d s s_1 A

---

1) Nobili, Antologia di Firenze, 1832, Nro. 142*; Pogg. Ann. 27, p. 401, 1833*.

der dem in AB vorhandenen Strome gleichgerichtet ist, also in der Figur von s_1 nach s fliesst. Ein Theil des Stromes gleicht sich in den von AB entfernter liegenden Theilen des Kupferstreifens selbst aus, ein anderer Theil verzweigt sich von s und s_1 aus durch die daselbst anliegenden Federn. — Wird die Holzscheibe mit dem Kupferstreifen entgegengesetzt gedreht, so nähern sich die Theile desselben dem Leiter AB bei ihrem Durchgange durch die Linie ss_1; der Strom ist dem Strom in AB entgegengerichtet und fliesst von s nach s_1.

362 Lässt man den Kupferstreifen rotiren, während in der Höhe seines oberen Randes ein horizontaler geradliniger Leiter ABE, Fig. 82, oder ein kreisförmiger Leiter ABE, Fig. 83, liegt, so entfernen sich, wenn

Fig. 82.

Fig. 83.

der Streifen in der Richtung des Pfeiles cd rotirt, die unter ss_1 liegenden Theile desselben von den zwischen A und B liegenden Stellen des Stromleiters ABE. Fliesst z. B. der Strom in ABE in der Richtung von A nach B und E, so wird dadurch in den Theilen unter ss_1 ein Strom inducirt, welcher dieselben den Theilen AB des Stromleiters durch seine elektrodynamische Wirkung nähern würde, also wie der Strom AB zur Kreuzungsstelle beider Ströme hinfliesst, d. h. die Richtung $s_1 s$ hat. Ebenso wird durch die Annäherung der links von ss_1 liegenden Theile des Streifens an die Theile BE des Leiters ABE in den ersteren ein dem Strome in letzterem entgegengesetzter Strom inducirt, der, da jener Strom von der Kreuzungsstelle fortfliesst, wiederum von s_1 nach s fliesst. Beide Ströme addiren sich zu einem gemeinschaftlichen, von s_1 nach s fliessenden Strom, von dem sich ein Theil durch die Drähte e und f zum Galvanometer verzweigt. — Bei der Umkehrung der Rotationsrichtung des Streifens kehrt sich die Richtung der inducirten Ströme um.

Liegt der Stromleiter auf halber Höhe des Streifens, so ist in der oberen und unteren Hälfte die Richtung der inducirenden Ströme die entgegengesetzte, und zwar fliessen, je nachdem die Richtung der Rotation des Streifens der Richtung des Stromes im Leiter gleich- oder entgegengerichtet ist, die inducirten Ströme von beiden Rändern des Streifens zu seiner Mitte oder von letzterer zu seinen Rändern. Lässt man also eine Feder f, Fig. 84, gegen die Mitte, zwei andere Federn g und h gegen die Ränder des Streifens schleifen, verbindet die Feder f mit dem

einen und die beiden Federn *g* und *h* mit dem anderen Ende des Drahtes eines Galvanometers, so erhält man in demselben einen Strom; nicht aber, wenn man nur die Federn *g* und *h* mit dem Galvanometer verbindet.

Fig. 84. Fig. 85. Fig. 86.

363 Lässt man eine dicke, massive Platte oder Kugel von Kupfer, Fig. 85, neben einem geraden Leiter oder inmitten eines kreisförmigen Leiters rotiren, dessen Ebene auf der Rotationsaxe senkrecht steht, so entstehen in derselben ganz ebenso inducirte Ströme, welche also in der Kugel von den Polen zu dem in der Ebene des Leiters liegenden Aequator derselben, oder umgekehrt fliessen. Ohne eine Ableitung der Pole der Kugel einerseits, der äquatorialen Zone derselben andererseits, würde man eine Anhäufung von statischer Elektricität an den Polen und am Aequator erhalten.

Liegt der kreisförmige Leiter in einer durch die Rotationsaxe gelegten Meridianebene der Kugel, so haben die in ihr inducirten Ströme die in Fig. 86 angedeutete Richtung und gleichen sich in der Masse der Kugel selbst aus. Man kann die Intensität derselben verstärken, wenn man den inducirenden Leiter aus mehreren Windungen bildet.

Nähert man der Kugel eine Declinationsnadel an verschiedenen Stellen, so wird ihr einer oder anderer Pol von derselben angezogen, indem die in sich geschlossenen Inductionsströme auf die Nadel wie ein Magnet wirken, welcher in der Kugel liegt.

Wird der kreisförmige Leiter mit der rotirenden Kugel oder den rotirenden Kupferringen fest verbunden, indem man z. B. seine Enden an zwei auf die Rotationsaxe aufgesetzte Metallscheiben löthet, gegen welche zwei mit den Polen der Säule verbundene Federn schleifen, so kann man, wenn die zu den Federn führenden Theile der Stromleitung nicht inducirend wirken, bei der Rotation des ganzen Systems keine inducirten Ströme erhalten, da sich die relative Stellung der einzelnen Punkte des Stromleiters und der inducirten Kupfermasse nicht ändert.

364 Die durch galvanische Ströme in bewegten Metallmassen inducirten Ströme wirken, wie alle anderen Ströme, durch ihre elektrodynamischen

Eigenschaften auf die inducirenden Ströme zurück. Sind die Leiter der letzteren beweglich, so können sie hierdurch aus ihrer Ruhelage abgelenkt werden.

Hängt man z. B. einen in Form eines Parallelogrammes gebogenen Kupferdraht auf zwei Stahlspitzen an dem Ampère'schen Stativ, Bd. III, §. 19, auf, so stellt er sich durch die Einwirkung des Erdmagnetismus mit seiner Ebene von Ost nach West ein. Bringt man jetzt unter die untere Seite des Parallelogrammes eine rotirende Kupferscheibe, so dass die erstere über dem Durchmesser der letzteren schwebt, so werden bei der Rotation der Scheibe in ihren, der unteren Seite des Parallelogrammes sich nähernden Theilen Ströme inducirt, die den Strömen in jener Seite entgegengerichtet sind; in den von derselben sich entfernenden Theilen aber gleichgerichtete Ströme. Die ersteren Ströme stossen den Draht ab, die letzteren ziehen ihn an, so dass das Drahtparallelogramm im Sinne der Rotation der Scheibe aus seiner Lage abgelenkt wird.

Lässt man bei diesen Versuchen die Kupferscheibe z. B. unter dem Bd. III, §. 14, Fig. 15, abgebildeten Apparat rotiren, so kann man den auf demselben schwebenden Draht in eine continuirliche Rotation versetzen [1]). — Analoge Erscheinungen zeigen sich, wenn man an dem Ampère'schen Stativ eine vom Strom durchflossene horizontale Drahtspirale über einer rotirenden Kupferscheibe aufhängt. Dieselbe folgt ebenfalls der Rotation der Scheibe [2]).

365 Auch durch Magnetoinduction kann man in körperlichen Leitern Ströme induciren. Zieht man z. B. zwischen den cylindrischen Halbankern N und S, Fig. 87, welche man auf die Pole eines Magnetes gelegt hat, einen Kupferblechstreifen ab hindurch, und lässt gegen seine amalgamirten Ränder zwei Federn c und d schleifen, welche mit dem Galvanometer verbunden sind, so werden in den einzelnen Theilen des Streifens Ströme erregt, auf welche die Magnetpole eine derartige elektromagnetische Wirkung ausüben, dass sie die Bewegung desselben zu hemmen streben. Bei der in der Figur durch den horizontalen Pfeil angedeuteten Bewegungsrichtung des Streifens ab müssen die Ströme also von oben nach unten fliessen. Der grösste Theil dieser Ströme gleicht sich in den, von den Magnetpolen entfernteren Stellen des Streifens aus; ein Theil derselben verzweigt sich durch das Galvanometer. — Diese Wirkung tritt schon ein, wenn nur ein einzelner Draht, dessen Enden mit dem Galvanometer verbunden sind, in

Fig. 87.

[1]) Pohl, Pogg. Ann. 8, p. 395, 1826*. — [2]) Ampère und Colladon, Bullet. d. Sciences, 6, p. 211*; Pogg. Ann. 8, p. 518, 1826*.

einer gegen seine Axe senkrechten Richtung in der äquatorialen Ebene zwischen den Magnetpolen durchgeschoben wird. — Zieht man eine in einer Ebene gewundene Drahtspirale, welche man mit dem Galvanometer verbunden hat, zwischen den Magnetpolen durch, so dass ihre Ebene mit der Aequatorialebene zusammenfällt, so behält der inducirte Strom eine constante Richtung, bis die Mitte der Spirale sich zwischen den Magnetpolen befindet, und kehrt sich bei weiterem Fortschieben der Spirale um, da jetzt die inducirten Ströme in den diametral entgegengesetzten Hälften der Windungen der Spirale zwar in Bezug auf die Lage der Magnetpole in der gleichen, in Bezug auf die fortlaufende Richtung des Drahtes der Spirale aber in entgegengesetzter Richtung fliessen wie vorher.

Lässt man analog dem oben beschriebenen Versuche einen reifenförmigen, auf einer Holzscheibe befestigten Metallstreifen (wie in Fig. 81) vor dem einen Pol eines Magnetes rotiren, so erhält man bei Ableitung der Punkte s und s_1 desselben zum Galvanometer constante Ströme.

366 Ganz ähnliche Inductionserscheinungen erhält man, wenn man eine kupferne Scheibe zwischen den Polen N und S, Fig. 88, eines Magnetes oder Elektromagnetes in Rotation versetzt. Zweckmässig legt man

Fig. 88.

hierbei gegen die Pole noch zwei cylindrische Halbanker, deren Enden bis dicht an die beiden Seiten der Scheibe herangehen. Die metallene Axe der Scheibe ruht in einem metallenen Lager und ist dadurch mit dem einen Ende des Drahtes eines Multiplicators m verbunden. Gegen den Rand der Scheibe schleift eine Feder s, an der das andere Ende des Multiplicatordrahtes befestigt wird. Bei der Rotation der Scheibe weicht die Nadel des Multiplicators aus. Wiederum werden in allen einzelnen Radien der Scheibe Ströme inducirt, durch deren elektromagnetische Wechselwirkung mit den Magnetpolen die Bewegung der Scheibe selbst gehemmt wird. Dieselben müssen also von dem Centrum der Scheibe zu

ihrer Peripherie fliessen, wenn, wie in Fig. 88 der Nordpol des Magnetes sich vor, der Südpol hinter der rotirenden Scheibe befindet, und dieselbe in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung rotirt. Liegt daher die Feder *s* gegen einen Punkt *b* oder b_1 der Peripherie, welcher vor oder hinter den Magnetpolen liegt, so zeigt das mit der Axe der Scheibe und der Feder *s* verbundene Galvanometer in beiden Fällen einen gleichgerichteten Strom an. Lässt man an beiden Punkten *b* und b_1 der Scheibe Federn schleifen, welche mit dem einen Ende des Drahtes des Galvanometers verbunden sind, während das andere Ende desselben zur Axe der Scheibe geführt ist, so addiren sich die beiden, von *a* nach *b* und b_1 gehenden Ströme. — Keinen Strom erhält man, wenn man die beiden gleich weit vor und hinter den Magnetpolen liegenden Punkte *b* und b_1 mit den beiden Enden des Multiplicatordrahtes des Galvanometers verbindet. — Bei umgekehrter Rotation der Scheibe oder Verwechselung der Magnetpole kehrt sich die Richtung der Inductionsströme in ihr um.

Legt man an die Axe und den Rand der Scheibe keine ableitenden Drähte, so gleichen sich die Ströme, welche in ihren, den Magnetpolen zunächst liegenden Radien inducirt werden, in den ferneren Theilen der Scheibe aus. Legt man daher an zwei ungleich weit von den Magnetpolen entfernte Punkte derselben Federn, welche mit dem Galvanometer verbunden sind, so erhält man Ströme, welche von den, in der Scheibe circulirenden Strömen abgezweigt sind [1]).

Ganz gleiche Ströme treten in der Scheibe auf, wenn man sie vor einem einzelnen Magnetpol in Rotation versetzt, z. B. die Scheibe in horizontaler Richtung auf die Axe einer Centrifugalmaschine aufsetzt, und unter ihr einen verticalen Magnetstab aufstellt, dessen einer Pol sich dicht unter ihrer Ebene befindet. — Befindet sich der Magnet in der Drehungsaxe der Scheibe, so tritt die unipolare Induction ein (vgl. §. 72).

Bringt man denselben Pol des Magnetes, statt unter der Ebene der Scheibe, dicht über derselben an, so kehrt sich die Richtung der Inductionsströme um, da in Bezug auf ihre Bewegung die Richtung der Molecularströme im Magnet umgekehrt ist. — Liegt der Magnet in der Ebene der Scheibe, so muss die inducirende Wirkung Null sein.

Besteht die Scheibe, Fig. 88, statt aus einer massiven Metallplatte, aus einzelnen, strahlenförmig von der Axe ausgehenden Spitzen, welche nach einander gegen die Feder *s* gegenschlagen und zwischen den Magnetpolen hindurchgehen, so ist die Induction in den einzelnen Spitzen dieselbe, wie vorher in den Radien der vollen Scheibe.

Diese Versuche sind gewissermaassen die Umkehrung der Bd. III, §. 186 beschriebenen Experimente mit dem Barlow'schen Rade. Wie das daselbst gezeichnete Spitzenrad unter dem Einfluss eines Magnetes rotirt, wenn ein Strom in radialer Richtung hindurch geleitet wird, so rotirt auch eine an Stelle des Spitzenrades gesetzte volle Scheibe; um-

---

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 1, §. 81 u. f., 1831*; vgl. auch Nobili, l. c.

gekehrt wird in beiden, wenn sie mechanisch zwischen den Magnetpolen in Rotation versetzt werden, ein Strom inducirt, der durch seine elektromagnetische Wirkung die Rotation der Scheibe aufhalten würde.

367 Auf experimentellem Wege lässt sich die Richtung der Strömungen in bewegten Metallstreifen und rotirenden Scheiben in der Weise bestimmen, dass man gegen ihre einzelnen Stellen zwei mit den Enden des Galvanometerdrahtes verbundene Federn drückt und die Punkte aufsucht, zwischen welchen kein Strom fliesst. Man bestimmt so zunächst die isoelektrischen Curven, auf denen nach Analogie des Verhaltens constanter Ströme die Linien senkrecht stehen sollten, welche die Stromesbahnen bezeichnen.

Ein ähnliches Verfahren hat Matteucci[1]) angewendet, indem er namentlich den Mittelpunkt der rotirenden Scheibe und verschiedene andere Punkte derselben mit dem Galvanometer verband. In Fig. 89 bezeichnen die starken Linien die isoelektrischen, die feineren Linien

Fig. 89.

Fig. 90.

die Strömungscurven in einer Scheibe, welche in der Richtung der Pfeile über einem Magnetpol *S* rotirt, dessen Abstand von dem Mittelpunkt der Scheibe ihrem halben Radius gleich ist.

Verbindet man den Mittelpunkt *O* der Scheibe mit dem einen Ende, und einen Punkt, welcher innerhalb des durch den Pol *S* gehenden, eine isoelektrische Curve darstellenden Kreises *SABO* liegt, mit dem anderen Ende des Galvanometerdrahtes, so erhält man bei einer bestimmten Richtung der Rotation einen durch das Galvanometer von letzteren Punkten zum Punkt *O* fliessenden Strom. Bringt man das zweite Ende des Galvanometerdrahtes auf Punkte ausserhalb des Kreises *SABO*, so kehrt sich der Strom um, so dass die innerhalb und ausserhalb des Kreises liegenden Punkte der Scheibe verschiedene elektrische Zustände besitzen.

[1]) Matteucci, Ann. de Chim. et de Phys. [3] **49**, p. 129, 1857*.

Dies ist durch die Zeichen + und — angedeutet. Der Kreis *SABO* selbst ist demnach eine neutrale Curve ohne Spannung.

Fig. 90 giebt nach Matteucci dieselben Resultate für eine über den beiden entgegengesetzten Polen *N* und *S* eines oder zweier, vertical gestellter Magnete in horizontaler Richtung rotirende Scheibe. — Der, eine isoelektrische Curve darstellende, durch die Pole *N* und *S* gehende Kreis ist nicht mit Sicherheit festzustellen; es wäre möglich, dass er durch zwei, durch die Pole und den Mittelpunkt der Scheibe gehende, annähernd kreisförmige Linien ersetzt werden müsste; dann würden die Erscheinungen der Induction auf beiden Seiten des Durchmessers *CAOBD*, welcher auf der axialen Linie *NS* senkrecht steht, den in Fig. 89 gezeichneten Erscheinungen analog sein. Der Durchmesser *CAOBD* ist gleichfalls eine neutrale Linie, deren Punkte gegen den Mittelpunkt *O* keine elektrische Spannung zeigen.

Diese Beobachtungen Matteucci's stimmen mit den früheren Darstellungen, namentlich von Nobili[1]), in Betreff der Stromverzweigung

Fig. 91.

Fig. 92.

im vorliegenden Falle nicht überein, nach denen man statt der von Matteucci aufgestellten vier, nur zwei geschlossene Systeme von Strömungscurven, etwa wie in Fig. 94, p. 307, annahm.

Fig. 91 stellt die isoelektrischen Curven für eine, über vier gleichnamigen Polen rotirende Scheibe, Fig. 92 für einen ringförmigen, vor einem Pol *S* rotirenden Metallstreifen dar.

368 Indess ist diese Art, die Strömungscurven als Normalen auf den isoelektrischen Curven abzuleiten, nicht richtig, wie sich aus Fig. 90 ersehen lässt. Gehen nämlich die Strömungscurven durch die Punkte *a* und *b* der Linie *NS*, so müsste der eine derselben ein Einströmungspunkt, der andere ein Ausströmungspunkt der Elektricitäten in der Scheibe sein, was nicht möglich ist, da solche Zu- und Ausströmungen in und aus der Scheibe nicht existiren. Endlich verschwinden an den Rändern der Scheibe die auf letzteren normalen Componenten der Ströme nicht. Auch würde die Analogie zwischen dem Ver-

[1]) Nobili, Pogg. Ann. 27, p. 426, 1833*.

halten der Bahnen der constanten Ströme und der in einer rotirenden Scheibe inducirten Ströme für die isoelektrischen Curven nicht durchaus gültig sein, da im ersten Falle nur die Potentialdifferenz der frei auf der Oberfläche des Leiters verbreiteten Elektricitäten an zwei Punkten die zwischen ihnen wirkende elektromotorische Kraft bedingt, in letzterer hierzu noch die Wirkung der im Inneren des Leiters verbreiteten Elektricitäten kommt, nämlich die durch die Induction durch den Magnet erzeugten und die durch das Entstehen und Verschwinden des Stromes in anderen Theilen der rotirenden Scheibe an der beobachteten Stelle inducirten elektromotorischen Kräfte, welche letzteren nicht ohne Weiteres einem Potential entsprechen. Wenn daher auch durch die galvanometrischen Versuche die isoelektrischen Curven bestimmt sind, so folgen aus ihnen in der oben angegebenen Weise doch nicht direct die Strömungscurven.

369 Bei der mathematischen Berechnung der Induction in einer vor Magnetpolen rotirenden Metallscheibe kann man zur Durchführung der Rechnung annehmen, dass die in irgend einem Element des körperlichen Leiters inducirte elektromotorische Kraft dieselbe ist, wie wenn jenes Element isolirt wäre.

In jedem Element lässt sich eine Richtung feststellen, in welcher die inducirte elektromotorische Kraft ein Maximum ist; in anderen Richtungen ist sie gleich jener Kraft, multiplicirt mit dem Cosinus der Neigung zwischen derselben und der Richtung der grössten Induction.

Nach Bestimmung der, in verschiedenen Richtungen inducirten elektromotorischen Kräfte kann man dann nach den Kirchhoff'schen Formeln die Strömungscurven berechnen.

Bezeichnet V die Potentialfunction der freien Elektricitäten an jeder Stelle des Leiters, so muss $\partial^2 V/\partial x^2 + \partial^2 V/\partial y^2 + \partial^2 V/\partial z^2 = 0$ sein, wo x, y, z die Coordinaten der einzelnen Punkte bezeichnen. Für die Oberfläche der Körper muss $\partial V/\partial N = 0$ sein, wo N die auf der Oberfläche errichtete Normale angiebt.

Dabei ist indess zu beachten, dass die inducirte elektromotorische Kraft nicht plötzlich verschwindet, bei sehr schnellen Bewegungen des inducirten Körpers also auch die Induction in Betracht zu ziehen ist, welche in demselben kurz vor dem Augenblicke stattfindet, für welchen man die Stromescurven berechnen will (s. w. u.).

370 Eine vollständigere Berechnung der Bahnen der in der rotirenden Metallscheibe unter Einfluss magnetischer Kräfte inducirten Ströme ist von Jochmann[1]) unter der Voraussetzung ausgeführt worden, dass die

---

[1]) Jochmann, Crelle's Journ. **63**, p. 1, 1863*; Pogg. Ann. **122**, p. 214, 1864*.

in der Scheibe selbst inducirten Ströme eine so geringe Intensität besitzen, dass die durch sie in anderen Theilen der Scheibe inducirten elektromotorischen Kräfte zu vernachlässigen sind, und also allein die directe Inductionswirkung der Magnete zu berücksichtigen ist. Diese Annahme ist statthaft, wenn die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe nicht zu gross ist [1]).

Bezeichnet man die Coordinaten des magnetischen Elementes μ mit $x_1 y_1 z_1$, die Coordinaten eines in einer bestimmten Richtung bewegten Leiterelementes mit xyz, und sind die Componenten der Geschwindigkeit ω des letzteren nach den drei Axen gleich $\xi\eta\zeta$, ist die Inductionsconstante gleich Eins, so sind die Componenten der in dem Leiterelement inducirten elektromotorischen Kräfte nach der Richtung der drei Axen

$$A = 2\varepsilon\mu \left\{\frac{z_1 - z}{r^3}\eta - \frac{y_1 - y}{r^3}\zeta\right\} = \left(\eta \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial z} - \zeta \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial y}\right)$$

$$B = 2\varepsilon\mu \left\{\frac{x_1 - x}{r^3}\zeta - \frac{z_1 - z}{r^3}\xi\right\} = \left(\zeta \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial x} - \xi \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial z}\right)$$

$$C = 2\varepsilon\mu \left\{\frac{y_1 - y}{r_1}\xi - \frac{x_1 - x}{r^3}\eta\right\} = \left(\xi \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial y} - \eta \frac{\partial \frac{\mu}{r}}{\partial x}\right).$$

Ist nun

$$P = \int \frac{\mu}{r}\, dx_1\, dy_1\, dz_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

das Potential der magnetischen Masse in sämmtlichen, ausserhalb des Leiterelementes gelegenen Raumelementen, so ist bei der Summation die gesammte elektromotorische Kraft nach den drei Axen

$$A = \left(\eta \frac{\partial P}{\partial z} - \zeta \frac{\partial P}{\partial y}\right); \quad B = \left(\zeta \frac{\partial P}{\partial x} - \xi \frac{\partial P}{\partial z}\right); \quad C = \left(\xi \frac{\partial P}{\partial y} - \eta \frac{\partial P}{\partial x}\right) \quad \ldots \quad 2)$$

Im Inneren des rotirenden Leiters sollen keine freie Elektricitäten vorhanden sein; es muss demnach

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \text{ sein} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

[1]) Die allgemeinen Formeln für die in einem bewegten Körper durch ruhende Magnete inducirten Ströme ohne jene beschränkende Annahme hat Jochmann ebenfalls mit Zugrundelegung des Weber'schen Gesetzes der Induction (vergl. das Schlusscapitel) festgestellt; sie lassen sich indess nicht gut analytisch behandeln. Wir lassen die, jene Induction betreffenden Glieder um so eher fort, als die Anwendbarkeit der Weber'schen Formel für nicht geschlossene Leiter nicht unbedingt feststeht.

Werden bei der Rotation des Leiters freie Elektricitäten auf demselben vertheilt, deren Potential auf einem seiner Punkte V ist, ist K sein Leitungsvermögen, so sind die Componenten u, v, w der Stromesdichtigkeit im Punkt xyz gleich

$$u = K\left(-\frac{\partial V}{\partial x} + A\right); \quad v = K\left(-\frac{\partial V}{\partial y} + B\right); \quad w = K\left(-\frac{\partial V}{\partial z} + C\right) \quad \ldots 4)$$

Nehmen wir die z-Axe als Rotationsaxe, ist die Winkelgeschwindigkeit der Drehung n, so ist

$$\xi = -ny, \quad \eta = -nx, \quad \zeta = 0,$$

und bei Einführung dieser Werthe in Gleichung 2)

$$u = K\left(-\frac{\partial V}{\partial x} + nx\frac{\partial P}{\partial z}\right); \quad v = K\left(-\frac{\partial V}{\partial y} + ny\frac{\partial P}{\partial z}\right); \quad w = K\left[-\frac{\partial V}{\partial z} + n\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y}\right)\right]. \quad \ldots 5)$$

Damit ferner im Inneren des Körpers eine constante Strömung eintrete, muss

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

sein; letztere Gleichung ist demnach

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 2n\frac{\partial P}{\partial z} \quad \ldots\ldots\ldots 6)$$

An der Grenze des Körpers muss ferner

$$u\cos\lambda + v\cos\mu + w\cos\nu = 0 \quad \ldots\ldots\ldots 7)$$

oder

$$\frac{\partial V}{\partial x}\cos\lambda + \frac{\partial V}{\partial y}\cos\mu + \frac{\partial V}{\partial z}\cos\nu = n(x\cos\lambda + y\cos\mu)\frac{\partial P}{\partial z} - n\cos\nu\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y}\right) \quad \ldots\ldots\ldots 8)$$

sein, wo λ, μ, ν die Winkel sind, welche die Richtung der elektromotorischen Kraft mit den Coordinatenaxen einschliesst.

Ist die Vertheilung der magnetischen Fluida symmetrisch um die Rotationsaxe, also P nur eine Function von z und dem Abstande $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ von der Rotationsaxe, so wird den Gleichungen genügt durch die Annahme

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \text{also}$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = nx\frac{\partial P}{\partial z}; \quad \frac{\partial V}{\partial y} = ny\frac{\partial P}{\partial z}; \quad \frac{\partial V}{\partial z} = -n\left(x\frac{\partial P}{\partial x} + y\frac{\partial P}{\partial y}\right) \quad \ldots 9)$$

Führt man Polarcoordinaten ein, so werden diese Gleichungen

$$\frac{\partial V}{\partial r} = nr\,\frac{\partial P}{\partial z}; \quad \frac{\partial V}{\partial z} = -\,nr\,\frac{\partial P}{\partial r} \quad \ldots\ldots \quad 10)$$

Da das vollständige Differential von V

$$dV = \frac{\partial V}{\partial r}\,dr + \frac{\partial V}{\partial z}\,dz$$

ist, so folgt aus der Gleichung 10):

$$V = n\int\left(r\,\frac{\partial P}{\partial z}\,dr - r\,\frac{\partial P}{\partial r}\,dz\right) \ldots\ldots \quad 11)$$

Ist ferner die Dichtigkeit im Inneren des Körpers gleich σ, so ist nach Gleichung 9), wenn V_i der Werth von V daselbst ist

$$\frac{\partial^2 V_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial z^2} = 2n\,\frac{\partial P}{\partial z} = -\,4\pi\sigma \quad \ldots \quad 12)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich σ bestimmen. σ_0 an der Oberfläche ist durch die Bedingung

$$\left(\frac{\partial V}{\partial N}\right)_a - \left(\frac{\partial V}{\partial N}\right)_i = -\,4\pi\sigma_0 \ldots\ldots\ldots \quad 13)$$

gegeben; in welcher die beiden Differentiationen nach der Normale der Oberfläche des Körpers in der Richtung nach Innen und nach Aussen genommen sind.

Für eine Kugel, deren Rotationsaxe (z) mit der Richtung einer constanten magnetischen Kraft M zusammenfällt, ist 371

$$\frac{\partial P}{\partial z} = M; \quad V_i = \tfrac{1}{2}nMr^2 + Const \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

Ist R der Radius der Kugel, ϑ der Winkel zwischen einem beliebigen Radius und der z-Axe, so ist für den Endpunkt desselben $r = R\sin\vartheta$,

$$V_i = \tfrac{1}{2}nMR^2\sin^2\vartheta + Const \ldots\ldots\ldots \quad 15)$$

und

$$\sigma_0 = \frac{Const}{4\pi R} + \frac{nMR}{4\pi}\left({}^{11}/_6 - {}^5/_2\cos^2\vartheta\right) \ldots\ldots \quad 16)$$

Im Inneren ist überall die Dichtigkeit der freien Elektricität constant gleich

$$\sigma = -\,\frac{nM}{2\pi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 17)$$

Da die Gesammtmenge der freien Elektricität im Inneren und auf der Oberfläche der Kugel gleich Null sein muss, so muss $-\,{}^4/_3 R^3\pi\sigma + 4R^2\pi\sigma_0 = 0$ sein, woraus $Const = -\,{}^1/_3\,nMR^2$ folgt. Dann wird

$$\sigma_0 = \frac{nMR}{4\pi}\left({}^5/_2\sin^2\vartheta - 1\right).$$

Für einen beliebig gestalteten Rotationskörper, der um die z-Axe rotirt, in welcher zugleich ein mit dem Coordinatenanfangspunkt zusammenfallender Magnetpol μ liegt, ist $P = \mu / \sqrt{r^2 + z^2}$, also nach Gleichung 11)

$$V_i = \frac{n \mu z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + Const.$$

Bilden die Verbindungslinien des Coordinatenanfangspunktes mit zwei Punkten der Oberfläche des Körpers mit der z-Axe die Winkel γ_1 und γ_2, ist für beide Punkte $V_i = V_1$ und V_2, so folgt

$$V_2 - V_1 = n\mu (\cos\gamma_2 - \cos\gamma_1).$$

Werden also diese Punkte durch einen ruhenden Leiter von so grossem Widerstand ϱ verbunden, dass der in demselben fliessende Strom auf die elektrische Vertheilung in dem rotirenden Körper keinen Einfluss hat, so ist die Intensität des Stromes

$$I = \frac{V_2 - V_1}{\varrho} = \frac{n\mu}{\varrho} (\cos\gamma_2 - \cos\gamma_1),$$

wie wir schon §. 111 gefunden haben.

Das Potential einer in dieser Art rotirenden Kugel auf einen äusseren Punkt, welcher von dem Kugelmittelpunkt um die Länge L, von einem Element $d\omega$ der Oberfläche der Kugel um F absteht, ist

$$V_a = - n\mu \frac{L^2 - R^2}{4\pi R} \int \frac{\cos\gamma}{F^3} d\omega,$$

welche Formel sich durch die Anziehung eines der Kugel genäherten, elektrischen Körpers prüfen liesse.

Liegen die Magnetpole nicht in der Rotationsaxe, so bedürfen die Gleichungen 5), 6) und 7) einer anderen Lösung.

372 Ist der Rotationskörper eine durch zwei parallele Ebenen im Abstande 2δ von einander begrenzte Scheibe, welche um die auf denselben senkrechte (z) Axe rotirt, so seien die Gleichungen der Ebenen $z = +\delta$, $z = -\delta$; die Lage des magnetischen Pols μ ausserhalb der Scheibe sei durch die Coordinaten a, b, c gegeben; dann ist $P = \mu / \varrho$, wo $\varrho = + \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}$ der Abstand eines Punktes x, y, z der Scheibe von dem Pol μ ist. Für die Oberflächen der Scheibe ist zunächst die betreffende Gleichung 8) erfüllt, wenn die Strömungen parallel der Fläche der Scheibe erfolgen. Dann folgt aus Gl. 9)

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = - n \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial P}{\partial x} + y \frac{\partial P}{\partial y} \right),$$

also nach Gleichung 6)

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} - n \frac{\partial}{\partial z} \left(2P + x \frac{\partial P}{\partial x} + y \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0.$$

Diese Gleichung wird erfüllt, wenn

$$V = n\mu \left\{ -\frac{c-z}{\varrho} + \frac{a(x-a) + b(y-b)}{\varrho[\varrho + (c-z)]} \right\}$$

ist. Berechnet man hieraus u und v (Gleichung 5), so ergiebt sich

$$u = n\mu K \frac{\partial}{\partial y} \frac{ay - bx}{\varrho(\varrho + c - z)}; \quad v = n\mu K \frac{\partial}{\partial x} \frac{bx - ay}{\varrho(\varrho + c - z)},$$

Fig. 93.

A B

und die Gleichung der Strömungscurven ist

$$v\,dx - u\,dy = 0 \quad \text{oder} \quad \frac{bx - ay}{\varrho(\varrho + c - z)} = Const.$$

Setzt man $x - a = \xi$, $y - b = \eta$, $z - c = \zeta$, und legt die x-Axe durch den Pol μ und die Rotationsaxe, so ist $b = 0$ und es wird

$$u = n\mu K a \frac{\varrho^2(\varrho+\zeta)-\eta^2(2\varrho+\zeta)}{\varrho^3(\varrho+\zeta)^2}$$

$$v = n\mu K a \frac{\xi\eta(2\varrho+\zeta)}{\varrho^3(\varrho+\zeta)^2}$$

und die Gleichung der Strömungscurven

$$\frac{\eta}{\varrho(\varrho+\zeta)} = C.$$

Dies ist eine Gleichung vierten Grades. Indess entsprechen den Strömungscurven nur die Curven, für welche $\varrho = \sqrt{\xi^2+\eta^2+\zeta^2}$ positiv ist. Die Gestalt der Strömungscurven, Fig. 93, ist also von der Entfernung a des Poles von der Rotationsaxe unabhängig; die Stromesdichtigkeiten u und v werden aber a proportional und werden für $a=0$ ebenfalls gleich Null. Für $\eta = 0$ verschwindet auch die Stromesdichtigkeit v, so dass also die ξ-Axe von keiner Strömungscurve geschnitten wird. — Für $C = 0$ ist für alle Werthe von ϱ und ξ auch $\eta = 0$, also fällt die diesem Werthe entsprechende Strömungscurve mit der ξ-Axe zusammen. Für gleiche und entgegengesetzte Werthe von C erhält man Curven, die auf beiden Seiten symmetrisch zur ξ-Axe liegen. Ferner sind die Curven in sich geschlossen und jede einzelne hat in Bezug auf die η-Axe zwei symmetrische Hälften. Sie umschliessen dabei zwei auf der η-Axe liegende Wirbelpunkte, für welche $u = 0$ und $v = 0$ sind, und die der Gleichung

$$\eta = \pm\zeta\sqrt{\frac{1+\sqrt{5}}{2}} = \pm\, 1{,}272\,\zeta$$

entsprechen und auf zwei Geraden liegen, welche sich im inducirenden Pol in einem Winkel von 103° 39′ schneiden[1]). Liegt der Pol dicht an der Scheibe, so reduciren sich die Wirbelpunkte auf einen, dicht über dem Pol liegenden, um welchen sich die Strömungscurven schliessen[2]).

Sind mehrere Magnetpole vorhanden, so summiren sich, da die Gleichung für V linear ist, die Wirkungen, und es wird

$$V = n\sum\mu\left\{-\frac{c-z}{\zeta}+\frac{a(x-a)+b(y-b)}{\varrho(\varrho+c-z)}\right\}$$

und die Gleichung der Strömungscurven

$$\sum\frac{\mu(ay-bx)}{\varrho(\varrho+c-z)} = Const.$$

373 Liegen zwei gleich starke und entgegengesetzte Magnetpole in gleicher Entfernung von der Scheibe und in den Abständen $\pm a$ von der Umdrehungsaxe entfernt, so wird

[1]) In der Fig. 93 ist der Abstand des Poles von der Ebene der Zeichnung gleich $AB = 0{,}5$ gesetzt. — [2]) Letztere Curven sind auch von Felici berechnet (Annali di scienze matematiche e fisiche, 1853, p. 173, und 1854, p. 35*).

$$V = n\mu\left(\frac{c-z}{\varrho_2} - \frac{c-z}{\varrho_1} + \frac{a(a+x)}{\varrho_2(\varrho_2+c-z)} - \frac{a(a-x)}{\varrho_1(\varrho_1+c-z)}\right),$$

wo

$$\varrho_1^2 = (a-x)^2 + y^2 + (c-z)^2$$
$$\varrho_2^2 = (a+x)^2 + y^2 + (c-z)^2$$

Fig. 94.

ist. Die Gleichung der Strömungscurven ist dann

$$\frac{y}{\varrho_1(\varrho_1+c-z)} + \frac{y}{\varrho_2(\varrho_2+c-z)} = C.$$

Die Linien gleichen Potentials sind auf beifolgender Fig. 94 voll ausgezogen, die Strömungscurven punktirt für verschiedene Werthe von C gezeichnet. M ist die Rotationsaxe, $AB = 0{,}5$ der Abstand des Pols von der Ebene der Figur. Die Strömungscurven umschliessen also vier zu beiden Seiten der Pole liegende Wirbelpunkte, die Linien gleichen Potentials umschliessen je zwei in der Verbindungslinie der Pole zu beiden Seiten derselben liegende Punkte. Für $V = 0$ ist die Linie gleichen Potentials aus der auf der Verbindungslinie der Pole normalen Y-Axe und einer nahezu kreisförmigen, durch die Pole gehenden Linie zusammengesetzt. Wo die Y-Axe und diese Linie sich schneiden, schneiden sich auch zwei bestimmte Strömungscurven, für welche $C = 0{,}4152$ ist und welche jedem der Pole entsprechen. — Die Linien gleichen Potentials stimmen hiernach sehr vollständig mit den Beobachtungen von Matteucci überein, während die berechneten Strömungscurven mit den von Matteucci gezeichneten in Folge der oben erwähnten Ursachen nicht zusammenfallen [1]).

374 Schon Nobili [2]) beobachtete, dass bei schnellem Drehen der rotirenden Scheibe die Strömungscurven sich im Sinne der Rotationsrichtung verschieben. Er legte die eine Elektrode eines Galvanometers auf die Mitte, die andere auf einen Punkt E oder E_1, Fig. 95, der Peripherie der Scheibe, welcher um 90 Grad von der Verbindungslinie der Magnet-

---

[1]) Weitere Berechnungen:

Inductionsströme in Platten und Kugelschalen, welche vor Magneten um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Axe rotiren. Niven, Proc. Roy. Soc. 30, p. 113, 1880*.

Die Bewegung der Elektricität in einer leitenden Kugel ist von Riecke (Gött. Nachr. 1876, 17. Mai*) behandelt worden; namentlich die in der Kugel durch einen schwingenden Magnet erzeugte, und zwar je nachdem der Mittelpunkt des Magnets über, vor oder neben der leitenden Kugel liegt.

Himstedt (Wied. Ann. 11, p. 812, 1880*) hat die erhaltenen Formeln geprüft, indem er Kupferkugeln entweder in einem homogenen Magnetfelde oder ein aus zwei horizontalen entgegengestellten Magnetnadeln gebildetes astatisches System schwingen liess, während sich zwischen ihnen eine Kupferkugel befand.

Eine Berechnung der inducirten Ströme in einem Kreiscylinder von unendlicher Länge bei Rotation um seine Axe in einem gleichartigen Magnetfelde, dessen Kraftlinien auf der Cylinderaxe senkrecht stehen, ist von Oberbeck (Grunert's Archiv 56, p. 394, 1874*) unter Berücksichtigung der Inductionswirkungen höherer Ordnung vorgenommen worden. Es werden hierbei nur Ströme parallel der Cylinderaxe erzeugt. Auch ergiebt sich, dass die Inductionsströme höherer Ordnung völlig genügen, um die Verschiebung der Strömungsbahnen bei grösseren Drehungsgeschwindigkeiten zu erklären (siehe den folgenden Paragraphen). Ein Magnetpol wird von den Inductionsströmen im Cylinder angezogen oder abgestossen, und zwar, in Folge der Inductionsströme höherer Ordnung allein, auch wenn er in einer durch die Cylinderaxe gehenden Magnetkraftlinie liegt.

In Bezug auf die Berechnung müssen wir auf das Original verweisen.

Wir brauchen also keine Verzögerung der Induction selbst anzunehmen (vergl. F. E. Neumann, Abh. der Berl. Acad. 1845, p. 15*).

[2]) Nobili, Pogg. Ann. 27, p. 426, 1833*.

pole abstand. Bei langsamer Drehung der Scheibe zeigte die Galvanometernadel keine Ablenkung. Bei schnellerer Drehung musste er aber die zweite Elektrode im Sinne der Drehungsrichtung gegen einen Punkt X oder X_1 der Peripherie der Scheibe verschieben, um im Galvanometer keinen Strom wahrzunehmen. — Ebenso fand Matteucci (l. c.) die Verschiebung der isoelektrischen Curven. Ihr Drehungswinkel sollte der Drehungsgeschwindigkeit der Scheibe proportional sein. Die geschlossene neutrale Linie $SANB$, Fig. 90, auf der über zwei Magnetpolen rotirenden Scheibe wurde dabei ein wenig mehr gegen die Mitte derselben zusammengezogen [1]).

Fig. 95.

Diese Erfahrung sollte anzeigen, dass zur völligen Entwickelung der Inductionsströme eine gewisse Zeit erforderlich ist, welche gegen die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe nicht völlig verschwindet; ein Resultat, welches schon früher mit grosser Bestimmtheit aus dem Verhalten eines, über einer horizontalen rotirenden Metallscheibe vertical aufgehängten Magnetes abgeleitet worden war (s. w. u.). Die Erscheinung rührt von dem Verlauf der Inductionsströme höherer Ordnung her.

375 Die bei der relativen Bewegung eines Magnetes und einer Metallmasse in letzterer inducirten Ströme können auf den Magnet selbst durch ihre elektromagnetische Wirkung zurückwirken und Bewegungen desselben hervorrufen oder die ihm schon ertheilten Bewegungen verändern. Dies zeigt sich bei den von Arago [2]) gefundenen Erscheinungen des sogenannten Rotationsmagnetismus, durch dessen nähere Untersuchung Faraday auf die Entdeckung der Induction geführt wurde.

Stellt man auf eine feine, kurze, auf einer Glasplatte befestigte Spitze eine Magnetnadel, oder hängt eine solche Nadel horizontal an einem Coconfaden dicht über der Glasplatte auf, und versetzt unter der letzteren eine horizontale Scheibe von Metall z. B. von Kupfer, deren Centrum mit der Drehungsaxe der Magnetnadel zusammenfällt, vermittelst eines Schnurlaufes oder eines Uhrwerkes in Rotation, so wird die Magnetnadel zuerst in der Richtung der Drehung der Metallscheibe aus ihrer Gleichgewichtslage im magnetischen Meridian abgelenkt. Ist die Scheibe dick und gross, die Magnetnadel gehörig lang, so geräth sie sogar in eine, der Drehungsrichtung der Scheibe gleichgerichtete Rotation. — Um diese Rotation leichter hervorrufen zu können, ist es zweckmässig, die die Nadel richtende Kraft des Erdmagnetismus zu compensiren. Dies geschieht, indem man sich entweder einer Magnetnadel bedient, welche in

[1]) Vergl. auch Matteucci, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 27, p. 129, 1853*. — [2]) Arago, Ann. de Chim. et de Phys. 27, p. 363, 22. Nov. 1824*, ibid. 28, p. 325, 1825*; Pogg. Ann. 3, p. 343*.

der Mitte einen Folgepunkt hat, also daselbst z. B. einen Südpol, an den Enden zwei Nordpole zeigt; oder indem man sich der von Trémery angegebenen astatischen Nadel bedient, also dieselbe aus einem Mittelstück von Holz oder Elfenbein zusammengesetzt, in welches beiderseits zwei möglichst gleich starke Magnetnadeln in entgegengesetzter Richtung eingelassen sind; oder auch indem man der Nadel von Norden her den Nordpol eines Magnetstabes nähert[1]). — Ist die Nadel neben der Scheibe aufgestellt, so dass sich nur ihr einer Pol über ihr befindet, so wird bei der Rotation die Nadel in entgegengesetzter Richtung abgelenkt, wie wenn sie über dem Mittelpunkte der Scheibe schwebte.

376 Wird eine kleine horizontale Magnetnadel, die über der Mitte einer rotirenden, horizontalen Kupferscheibe aufgehängt und, wie erwähnt, im Sinne der Drehung abgelenkt wird, in der Richtung ihrer Axe gegen den Rand der Scheibe verschoben, so werden von beiden Polen Ströme inducirt, welche sie nach derselben Seite der Scheibe zu bewegen streben. Dabei sind aber die unter dem dem Rande zunächst liegenden Pole, z. B. dem Nordpol befindlichen Theile der Scheibe in schnellerer Bewegung, als die unter dem der Mitte näheren Südpol; ersterer wirkt also unter sonst gleichen Bedingungen stärker inducirend und wird stärker abgelenkt, als letzterer; die Ablenkung wird schwächer, als über dem Mittelpunkt, behält aber ihre Richtung bei. Nahe am Rande findet der ihm zunächst liegende Pol nicht an allen Seiten Metallmasse zur Erzeugung von Inductionsströmen; auch müssen letztere andere Bahnen einschlagen, als in einer allseitig ausgebreiteten Metallscheibe, so dass sie schwächer auf den Pol wirken, als die von dem der Mitte näher liegenden Pol inducirten Ströme auf letzteren; die Nadel wird jetzt im entgegengesetzten Sinne abgelenkt.

Hängt man über einer horizontalen rotirenden Scheibe einen ⌙⌝ förmigen Magnetstab so auf, dass sein einer Pol über der Scheibe schwebt und wesentlich allein von ihr beeinflusst wird, so nimmt aus dem letzteren Grunde die Ablenkung des Magnetstabes mit der Entfernung seines der Scheibe zugekehrten Poles von der Mitte der Scheibe ab[2]).

377 Hängt man ferner einen Magnetstab an dem einen Arm eines Wagebalkens in verticaler Lage über einer horizontalen Kupferscheibe auf, so wird er von derselben bei der Rotation abgestossen.

Wird endlich eine Inclinationsnadel über der rotirenden horizontalen Kupferscheibe in der Weise aufgehängt, dass die Nadel selbst vertical ist, ihre Drehungsaxe aber auf dem unter ihr befindlichen Radius der

[1]) Vergl. Prevost und Colladon, Bibl. univ. 29, p. 316, 1825*; Baumgartner und Ettingshausen, Zeitschr. f. Phys. u. Mathematik. 1, p. 139*; Böttger, Pogg. Ann. 50, p. 35, 1840*; Barlow, Edinb. philos. Journ. Nro. 25*; Baumgartner's Zeitschr. 1, p. 136, 1826*. — [2]) Lamont, Bericht der Münchener Sternwarte 1852, p. 132*.

Scheibe senkrecht steht, so wird die Nadel gegen den Mittelpunkt der Scheibe hingezogen, wenn sie sich nahe an demselben befindet; in weiterer Entfernung findet sich eine Stelle der Scheibe, über welcher die Nadel vertical bleibt, in noch weiterer Entfernung wird sie gegen den Rand der Scheibe hin abgelenkt. Ueber dem Mittelpunkt der Scheibe selbst bleibt die Nadel in Ruhe [1]).

Dieser Versuch lässt sich auch mit einer, an ihrem einen Ende an einem Faden vertical aufgehängten Magnetnadel anstellen, welche man über die verschiedenen Punkte der Scheibe bringt. — Man kann auch nach Pohl [2]) die Scheibe in einer verticalen, auf der Meridianebene senkrechten Ebene rotiren lassen und vor verschiedenen Punkten ihres horizontalen Durchmessers eine Declinationsnadel aufstellen.

Wir haben also drei Componenten der auf die Nadel wirkenden Kraft zu unterscheiden, von denen die erste auf der Ebene der rotirenden Scheibe senkrecht steht und die Nadel von der Scheibe entfernt; die zweite und dritte aber parallel der Ebene der Scheibe wirken, und zwar in der Richtung der Tangente und in der Richtung des Radius derselben.

378 In früheren Zeiten nahm man zur Erklärung der vorliegenden Phänomene an, die Pole des Magnetes über der rotirenden Scheibe erzeugten an den unter ihnen befindlichen Punkten derselben eine ihnen entgegengesetzte Polarität, welche auch noch fortbestände, wenn sich bei der Rotation der Scheibe ihre unter den Magnetpolen befindlichen Stellen von den Polen ein wenig entfernten [3]). — Diese Erklärung würde indess nur bei Metallen in Anwendung kommen können, die stark magnetisch sind, z. B. bei Eisen. Auch würde durch die Magnetisirung der horizontalen, rotirenden Scheibe nicht die Abstossung der vertical über ihr aufgehängten Magnete, sowie die Ablenkung derselben in radialer Richtung nach dem Centrum oder nach der Peripherie hin erklärt werden können.

Der Grund der Erscheinungen liegt vielmehr in den, in der bewegten Scheibe durch die Magnetnadel inducirten Strömen, welche durch ihre elektromagnetische Wechselwirkung mit der Nadel der Scheibe eine ihrer Bewegungsrichtung entgegengesetzte Drehung ertheilen würden, also auf die Nadel zurückwirkend, sie in gleichem Sinne mit der Rotation der Scheibe fortführen. — Hieraus erklärt sich zunächst die in der Richtung der Tangente der Scheibe auf sie wirkende Componente.

379 Sägt man in die rotirende Scheibe radiale, bis nahe an das Centrum gehende Einschnitte, so können die inducirten Ströme, welche in den an

---

[1]) Arago, Ann. de Chim. et de Phys. 32, p. 217, 1826*. — [2]) Pohl, Pogg. Ann. 8, p. 387, 1826*. — [3]) Duhamel, Ann. de Chim. et de Phys. 32, p. 216, 1826* (Mittheilungen der Akademie vom 27. Dec. 1824*).

den Magnetpolen vorbei bewegten Radien derselben entstehen, immer weniger zu Stande kommen, je grösser die Zahl der Einschnitte ist, da sich ihnen für ihre vollständige Schliessung keine Leitung darbietet. Mit wachsender Zahl der Einschnitte nimmt daher die Ablenkung der Magnetnadel über der rotirenden Scheibe ab. Werden aber die Einschnitte mit einem Metall zugelöthet, so tritt sie um so stärker auf, je besser das hierzu verwendete Metall leitet [1]). Aus demselben Grunde wirkt eine aus einem spiralförmig gewundenen Kupferdraht gebildete Scheibe auf die darüber befindliche Magnetnadel viel schwächer, als eine Blechplatte von gleicher Grösse und gleichem Gewicht [2]).

Hängt man neben der rotirenden Scheibe eine Magnetnadel auf, so dass ihre magnetische Axe sich in der Ebene der Scheibe befindet, so wird sie nicht abgelenkt, da nun keine inducirten Ströme entstehen.

Hängt man ferner neben der Scheibe eine Doppelnadel, Fig. 96, auf, so dass die beiden gleichgerichteten Nordpole der Nadeln sich gleich weit über und unter derselben befinden, so sind die bei der Rotation der Scheibe durch die Einwirkung beider Nadeln inducirten Ströme entgegengesetzt gerichtet und heben sich auf. Die Doppelnadel wird daher nicht abgelenkt.

Fig. 96.

Sind aber die Nadeln so verbunden, dass sich der Nordpol der einen über, der Südpol der anderen unter der rotirenden Scheibe befindet, oder umgekehrt, so addiren sich die inducirenden Wirkungen beider Pole, und die Nadel weicht in der der Rotation der Scheibe entsprechenden Richtung aus ihrer Gleichgewichtslage [3]).

Wird ebenso über dem Rande einer horizontalen, rotirenden Kupferscheibe an einem Faden ein verticaler Magnetstab mit dem Nordpole nach unten aufgehängt, welcher bis zu einem gewissen Grade bei der Rotation der Scheibe im Sinne ihrer Drehung abgelenkt wird, und von unten ein gleich starker Magnet mit seinem Nordpol dem Rande der Scheibe genähert, so wird bei gleichem Abstand der beiden Nordpole von derselben der oberhalb aufgehängte Magnet nicht mehr abgelenkt. Bei der Annäherung des Südpoles des unteren Magnetes nimmt dagegen die Ablenkung des oberen Magnetes zu.

Würde nur die durch die Magnete inducirte und etwa eine Zeit andauernde, magnetische Polarität der Scheibe die Bewegung des aufgehängten Magnetstabes bedingen, so hätte man gerade das entgegen-

---

[1]) Vergl. auch Herschel und Babbage, Phil. Trans. 1825, p. 481*. — [2]) Prevost und Colladon, l. c. — [3]) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 245 u. flgde. 1832*.

gesetzte Verhalten erwarten müssen, indem im ersteren Falle durch den unteren Magnet die durch den aufgehängten Magnet erzeugte magnetische Polarisirung der Scheibe verstärkt, im zweiten aber vernichtet worden wäre.

Dieses Verhalten würde sich bei Anwendung einer Eisenscheibe an Stelle der Kupferscheibe gezeigt haben, da bei jener die magnetische Polarisirung die Wirkung der inducirten Ströme überwiegt.

Legt man zwischen die rotirende Kupferscheibe und die über ihr befindliche Magnetnadel eine Eisenscheibe, so wird die Wirkung aufgehoben, da in der Eisenscheibe unter dem Magnetpol der Nadel ein ungleichnamiger Pol entsteht, dessen Inductionswirkung auf die Scheibe die der Nadel aufhebt. Eine ruhende Kupferplatte, welche man an Stelle der Eisenplatte bringt, vermindert ebenfalls die Wirkung, indem die in der rotirenden Scheibe erzeugten Inductionsströme Ströme höherer Ordnung in der ruhenden Platte induciren, deren elektromagnetische Wirkung auf die Nadel ihrer eigenen Wirkung entgegengesetzt ist[1]). — Die Einschaltung von nicht leitenden Platten, z. B. Glasplatten, ist dagegen ohne Einfluss.

380 Je schneller unter sonst gleichen Verhältnissen die Scheiben rotiren, um so intensiver sind die in der Zeiteinheit in ihnen inducirten Ströme. Da aber die von ihnen ausgehende Kraft, welche eine über ihnen hängende, durch den Erdmagnetismus gerichtete Declinationsnadel ablenkt, in tangentialer Richtung zur Rotationsrichtung der Scheibe wirkt, also auch senkrecht gegen die Axe der Nadel, so ist dieselbe dem Sinus des Ablenkungswinkels der letzteren proportional. Deshalb wächst auch (innerhalb gewisser Grenzen, s. w. u.) der Sinus des Ablenkungswinkels der Nadel der Drehungsgeschwindigkeit der Scheibe proportional.

Dieses Gesetz ist durch sorgfältige Versuche von Snow Harris[2]) geprüft worden. Er liess eine Nadel über einem ebenen Ringe von 5 Zoll äusserem und 3 Zoll innerem Durchmesser und 0,05 Zoll Dicke schwingen, welcher in schnelle Rotation versetzt wurde. Der ganze Apparat befand sich unter der Glocke einer Luftpumpe. Wenngleich die Luft auf etwa $^1/_2$ Zoll ausgepumpt war, musste doch die Nadel durch Papier- und Glasschirme vor Luftströmungen geschützt werden, da ohne diese Schirme auch Nadeln von unmagnetischen Stoffen an Stelle der Magnetnadel bei der Rotation des Kupferringes abgelenkt wurden. Verhielten sich die Zahlen der Drehungen des Ringes in einer Minute wie 357 : 714 = 1 : 2, so verhielten sich die Sinus der Ablenkungen der Nadel, mithin die ablenkenden Kräfte, wie $\sin 24^0 : \sin 56^0 = 1 : 2,038$.

381 Je besser ferner das Leitungsvermögen der rotirenden Metallscheiben ist, um so intensiver sind auch die in ihnen inducirten Ströme. Daher

[1]) Prevost u. Colladon, l. c. — [2]) Snow Harris, Phil. Trans. 1831, 1, p. 67*.

müssen sich die Sinus der Ablenkungen der über ihnen schwebenden Nadel wie ihre specifischen Leitungsfähigkeiten verhalten.

Als auf diese Weise Herschel und Babbage (l. c. §. 379) verschiedene Scheiben von 10 Zoll Durchmesser und $^1/_2$ Zoll Dicke gleich schnell unter einer Magnetnadel rotiren liessen, ergaben sich die Verhältnisse der Sinus der Ablenkungen der Nadel, d. i. die specifischen Leitungsfähigkeiten, wie in folgender Tabelle unter I angegeben ist. Die unter II erwähnten Zahlen sind auf ganz ähnlichem Wege von Nobili und Bacelli[1]) gefunden.

	I	II		I	II
Kupfer	100	100	Blei	25	17
Zink	93(?)	30	Antimon	9	—
Zinn	46	21	Wismuth	2	—
Messing . . .	—	23			

Diese Zahlen stimmen wenigstens annähernd mit den sonst erhaltenen Werthen der relativen Leitungsfähigkeiten der Metalle überein. Auch über Quecksilber, welches zwischen zwei, durch einen Ring von Wachs zusammengeklebten Glasplatten eingeschlossen und so in Rotation versetzt wird, wird eine Magnetnadel abgelenkt; ebenso über einer gut leitenden Kohlenscheibe, z. B. von Gasretortenkohle.

Ueber rotirenden Holzscheiben, flachen, mit Salzlösungen u. s. f. gefüllten und rotirenden Gefässen kann man wegen der geringen Leitungsfähigkeit derselben kaum Ablenkungen der Magnetnadel wahrnehmen[2]).

Da die Intensität der in den Scheiben inducirten Ströme bei solchen Dicken derselben, welche gegen ihren Abstand von den Magnetpolen zu vernachlässigen sind, den Dicken proportional ist, so ist in diesem Falle auch der Sinus der Ablenkung der über ihnen aufgehängten Magnetnadel eben denselben proportional. Die Wirkung zeigt sich indess auch schon bei sehr dünnen Platten, z. B. bei Stanniolblättchen, welche auf eine Glasplatte geklebt sind[3]).

Da ferner die Intensität der Inductionsströme bei gleicher Länge der Magnetnadel dem magnetischen Moment derselben proportional ist, so nimmt die ablenkende Wirkung der rotirenden Scheibe proportional dem Quadrat jenes Momentes zu[4]). Man könnte daher das Moment verschieden stark magnetisirter Nadeln durch ihre Ablenkungen über einer, mit constanter Geschwindigkeit rotirenden Scheibe bestimmen[5]).

Mit wachsender Entfernung der Magnetnadel von der Scheibe nimmt die Intensität der inducirten Ströme und so auch die Rückwirkung auf die Magnetnadel schnell ab.

---

[1]) Nobili und Bacelli, Bibl. univ. 31, p. 47, 1826*. Baumgartner und Ettingshausen's Zeitschr. 1, p. 142*. — [2]) Arago, l. c., glaubte eine solche Wirkung zu beobachten. Nobili und Bacelli, l. c., leugnen dieselbe. — [3]) Colladon u. Prevost, l. c. — [4]) Vergl. Christie, Phil. Trans. 1825, p. 501*. — [5]) Arago, Ann. de Chim. et de Phys. 30, p. 263, 1825*; Pogg. Ann. 5, p. 535*.

Als z. B. Harris (l. c.) bei seinen Versuchen die über dem rotirenden Ringe schwebende Nadel durch eine Mikrometerschraube in verschiedene Entfernung über denselben erhob, war die Ablenkung der Nadel:

Entfernung in Schraubengängen		Umdrehung in der Minute 178,5	357	714
4	Abl.:	18	38	—
5		12	24	56
6		—	16	—
8		4,5	9	—
10		3	6	12

Hiernach verhalten sich unter den gerade obwaltenden Versuchsbedingungen die ablenkenden Kräfte etwa umgekehrt wie die Quadrate der Entfernung der Nadel von der Scheibe.

382 Während bei diesen Versuchen nur die tangentiale Componente der Wirkung der Inductionsströme auf die Magnetnadel in Betracht kommt, ist noch die radiale und die auf der Ebene der Scheibe senkrechte Componente derselben zu erklären [1]).

Lägen die durch den einen Pol N, Fig. 97, einer Magnetnadel in einer rotirenden Scheibe inducirten Ströme zu beiden Seiten derselben symmetrisch, so könnte man die abstossende Wirkung der in Bezug auf die Rotationsrichtung hinter dem Pol N liegenden Ströme in einem Punkt a, die ebenso grosse anziehende Wirkung der vor dem Pole liegenden Ströme in einem Punkte b concentrirt denken, welche beide Punkte einen gleichen Abstand von dem unter Pol N liegenden Radius der Scheibe besässen. Die auf N wirkende Resultante der beiden von a und b ausgehenden Kräfte wäre parallel der Ebene der Scheibe und der Tangente ihrer Rotationsrichtung. Es könnten also die zwei anderen Componenten der Wirkung auf Pol N nicht auftreten.

Fig. 97.

Verschieben sich aber die Inductionsströme mit der rotirenden Scheibe in Folge der Ströme höherer Ordnung, so dass sie scheinbar eine gewisse Zeit andauern, so rückt der Punkt a gegen N vor nach a', b von N fort nach b'; die Abstossung von N durch a' wird grösser, die Anziehung durch b' kleiner, und die Resultante beider Kräfte ist ein wenig nach oben gerichtet. Sie hat eine auf der Ebene der Scheibe senkrechte, den Pol N von ihr entfernende Componente.

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 1, §. 125*; Ann. de Chim. et de Phys. 51, p. 422 u. flgde. 1832*. Moser, Repert. 1, p. 300, 1837*.

Liegt ferner der Pol N in der Nähe des Randes der Scheibe, so sind die Geschwindigkeiten der Theile des unter dem Magnet hindurchgehenden Radius derselben, welche dem Mittelpunkte und dem Rande näher liegen, als der unter dem Pol befindliche Punkt, und auf welche aus nächster Nähe die Inductionswirkung stattfindet, nicht sehr von einander verschieden; aus diesem Grunde allein würden also die inducirten Ströme nach dem Mittelpunkte und dem Rande der Scheibe hin ziemlich gleiche Intensität besitzen. Da sie aber am Rande keinen Platz zu ihrer Ausbreitung finden, so verbreiten sie sich mehr nach der Mitte der Scheibe; die Centra a und b ihrer Wirkung auf den Magnetpol liegen näher an derselben als Pol N. — Wären wieder a und b gleich weit von N entfernt, so würde dennoch die Resultante der von ihnen ausgehenden Kräfte der Tangente der Drehungsrichtung entsprechen. — Wenn aber durch die Verschiebung von a und b im Sinne der Rotationsrichtung die Abstossung von N durch a grösser ist, als die Anziehung durch b, so hat die resultirende Kraft noch eine gegen die Peripherie der Scheibe gerichtete Componente. — Befindet sich Pol N nahe dem Centrum der Scheibe, so finden freilich die Inductionsströme allerseits Metallmassen genug zu ihrer Ausbildung. Jetzt ist aber die Geschwindigkeit der jenseits des Magnets, dem Rande der Scheibe zu liegenden Theile verhältnissmässig viel grösser, als die der mehr centralen Theile; zugleich bewegen sich die jenseits des Centrums liegenden Theile derselben in entgegengesetzter Richtung. Die Inductionsströme breiten sich daher nach dem Rande der Scheibe zu in grösserer Intensität und weiter aus, als nach ihrer Mitte hin. Die Punkte a und b liegen der Peripherie der Scheibe näher, als der Magnetpol. Dann ergiebt die Verschiebung derselben mit der Rotation eine den Pol gegen das Centrum der Scheibe treibende Componente. — In einer mittleren Stellung des Poles N wird diese Componente Null.

Schon §. 375 haben wir erwähnt, dass die Intensität der in der Zeiteinheit in einer rotirenden Scheibe durch einen darüber befindlichen Magnet inducirten Ströme der Rotationsgeschwindigkeit proportional ist. Demnach ist mit Rücksicht auf die Verschiebung nach den Berechnungen von Baily[1]) die verticale Abstossung innerhalb gewisser Grenzen dem Quadrat der Rotationsgeschwindigkeit proportional.

383 Wir haben oben unter der Voraussetzung, dass die Inductionsströme sich nicht mit der rotirenden Scheibe verschieben, den Sinus der Ablenkung der über ihr schwebenden Magnetnadel ihrer Drehungsgeschwindigkeit proportional gesetzt. Verschieben sich dieselben aber bei wachsender Rotationsgeschwindigkeit immer mehr, so ändert sich dadurch das Verhältniss der drei Componenten ihrer Wirkung auf die Nadel. Die senkrechte Componente wächst auf Kosten der tangentialen.

---

[1]) Baily, Chem. News. 45, p. 230, 1882*; Beibl. 6, p. 698*.

Je weiter die Magnetnadel von der rotirenden Scheibe entfernt ist, desto grösser ist die Abnahme der tangentialen Componente. Als z. B. Matteucci[1]) eine Kupferscheibe von 118,5 mm Durchmesser und 304,7 g Gewicht resp. 12 und 48 mal in der Secunde unter einem 27 und 31 mm über ihr aufgehängten Magnetstab in Rotation versetzte, betrug das Verhältniss der Sinus der Ablenkungen bei beiden Entfernungen 1 : 4,112 und 1 : 3,708.

Bei einer Wismuthscheibe von gleichem Gewicht und Durchmesser, welche mit denselben Drehungsgeschwindigkeiten unter einem 7,8 und 8 mm über ihr aufgehängten Magnet rotirte, betrug das Verhältniss nur 1 : 2,778 und 1 : 2,776. Bei dieser Scheibe nimmt also die horizontale Componente bei schnellerer Drehung noch mehr ab; ein Beweis, dass die inducirten Ströme weiter ihrer Bewegung folgen, als in der besser leitenden Kupferscheibe.

384 Die Verzögerung bei der Induction in körperlichen Leitern ist auch durch Felici und Verdet nachgewiesen worden.

Felici[2]) versetzte eine hohle Messingkugel von 80 mm äusserem und 77 mm innerem Durchmesser durch eine Centrifugalmaschine in Rotation um eine verticale Axe. Die Kugel war mit einer Glasglocke bedeckt. Neben derselben war an dem Kopfe einer Drehwage vermittelst eines dünnen Messingfadens ein astatisches System von zwei, 5 mm dicken und 151,5 mm langen, in einem Abstande von 195 mm parallel über einander befestigten, horizontalen Stahlmagneten aufgehängt, so dass sich der untere, in Fig. 98 besonders gezeichnete Magnet NS mit dem Mittelpunkte O der rotirenden Kugel in einer Horizontalebene befand. Der Pol N des Magnetes war 50 mm, die Axe desselben 86 mm von dem Kugelmittelpunkte O entfernt. Das astatische System trug einen Spiegel, so dass man vermittelst Scala und Fernrohr seine Ablenkungen zu bestimmen vermochte.

Fig. 98.

Rotirte die Kugel langsam in dem einen oder anderen Sinne, so wurde das astatische System in Folge der in ihr entstehenden Ströme abgelenkt, und zwar je nach der Rotationsrichtung um gleichviel nach der einen oder anderen Seite. Bei schneller Rotation war indess, als die Kugel sich im Sinne des in der Fig. 98 gezeichneten Pfeiles drehte, die Abstossung des Poles N bedeutender, als die Anziehung desselben bei entgegengesetzter Rotationsrichtung.

---

[1]) Matteucci, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 49, p. 144, 1856*. — [2]) Felici, Nuovo cimento 9, p. 16, 1859*.

Dieses Resultat ergiebt sich nach Felici aus folgender Betrachtung:

Rotirt die Kugel O vor dem Pole N des Magnetes NS um eine durch den Mittelpunkt O gehende und auf der Ebene NOS senkrechte Axe, so bilden die in ihr inducirten Ströme Kreise, deren Ebenen im Wesentlichen einander parallel sind, und deren Mittelpunkte auf einer, auf der Rotationsaxe und Linie ON senkrechten Linie ab liegen. Die Wechselwirkung dieser Kreisströme mit dem Magnete erzeugt erstens ein Kräftepaar, welches die Rotation der Kugel aufhalten würde und zweitens eine translatorische, je nach der relativen Lage des Magnetes und der Kugel und ihrer Rotationsrichtung anziehende oder abstossende Kraft zwischen beiden.

Ist der Winkel $SNO < 90^0$, und dreht sich die Kugel entsprechend dem Pfeil in der Fig. 98, so dass das dem Magnet zunächst liegende Ende a der Linie ab sich demselben nähert, so wirkt das Ende a wie ein dem Pole N gleichnamiger Pol, es tritt Abstossung ein; bei umgekehrter Rotation tritt Anziehung ein. Wenn sich nun bei schneller Rotation die inducirten Stromkreise im Sinne der Rotation verschieben, so nähert sich bei dem in der Figur gezeichneten Falle der Punkt a dem Pol N; im entgegengesetzten Falle entfernt er sich von demselben. Die Abstossung des Poles N ist also im ersteren Falle grösser, als im zweiten die Anziehung, wie es auch der Versuch ergiebt.

Durch dieses Andauern der Inductionsströme sucht Felici[1]) auch den Diamagnetismus der Körper zu erklären. Er nimmt an, dass die Atome derselben um ihre Axen nach allen möglichen Richtungen rotiren. Dies würde auch bei den Krystallen eintreten, da im Allgemeinen in ihnen die Rotationsaxen der Molecüle gegen die Symmetrieaxe symmetrisch liegen müssen. Befindet sich nun ein Körper vor einem Magnetpol, so kann man die Rotation jedes Molecüls in zwei Theile zerlegen, in eine Rotation um eine bestimmte Axe, durch die keine wirksamen Inductionsströme erzeugt werden, und in eine Rotation, welche Inductionsströme hervorruft, die, wie bei der oben erwähnten Rotation der Messingkugel, elektromagnetische Wechselwirkungen mit dem Magnetpole zeigen. Wie dort würde die durch die Rotation der einen Molecüle in dem einen Sinn bewirkte Abstossung grösser sein, als die Anziehung in Folge der entgegengesetzten Rotation der anderen Molecüle. So würde sich die diamagnetische Abstossung erklären, welche an jeder Stelle der Körper in einer bestimmten Richtung ein Maximum wäre. — Für die genauere Prüfung dieser Theorie fehlen indess vorläufig noch die Anhaltspunkte, da man nicht bestimmen kann, ob und wie schnell und in welchen Richtungen die Molecüle der Körper rotiren, wie gross ihre Leitungsfähigkeit und die Zeit des Andauerns der Inductionsströme in ihnen ist u. s. f.

---

[1]) Felici, l. c.

Bei den Versuchen von Verdet[1]) wurde der Magnet einer Page'schen Magnetelektrisirmaschine (vergl. das betr. Capitel) durch eine hufeisenförmige Drahtspirale von 600 mm Länge und 35 mm Durchmesser ersetzt, welche aus einem 70 m langen, 2 mm dicken Draht in fünf Lagen gewickelt war. Die beiden Schenkel derselben waren mit je einer Inductionsspirale von 150 mm Länge und 37 mm innerem Durchmesser umgeben, welche aus 7500 Umwindungen eines 0,25 mm dicken, übersponnenen Kupferdrahtes gebildet war. Die Inductionsspiralen waren einerseits mit einander, und das freie Ende der einen mit dem einen Ende des Multiplicators eines Galvanometers verbunden. Vor den Polen der hufeisenförmigen Spirale wurden durch ein Schwungrad mit einem Schnurlauf rechteckige Anker aus verschiedenen Metallen um eine den Schenkeln der Spirale parallele und in der Mitte zwischen ihnen liegende Axe in Rotation versetzt. Auf die Axe war ein Commutator aufgesetzt, bestehend aus einer Glaswalze, welche an dem einen Ende einen kupfernen Ring trug, von welchem zwei diametral gegenüberstehende, schmale Kupferstreifen über die Walze hinübergingen, welche 20 oder 35 Grad ihres Umfanges breit waren. Gegen den Ring schleifte eine mit dem freien Ende der zweiten Inductionsspirale, gegen den mit den Kupferstreifen versehenen Theil der Glaswalze eine zweite mit dem zweiten Leitungsdraht des Galvanometers verbundene Feder. — Durch die hufeisenförmige Spirale wurde ein Strom von 20 Bunsen'schen Elementen geleitet. Versetzt man den Anker in Rotation, so werden in seiner Masse Inductionsströme erzeugt, deren Richtung und Intensität sich bei jedem Umlauf desselben ändert. Hierdurch werden indirect in den Inductionsspiralen auf den Schenkeln der hufeisenförmigen Spirale Ströme inducirt, welche bei je zwei diametral entgegengesetzten Lagen des Ankers gleiche Richtung und Intensität haben, da dann die Inductionsströme im Anker gegen die Inductionsspiralen gleiche Lage haben. Durch die zwei Kupferstreifen des Commutators werden also gleiche Ströme zum Galvanometer geführt. Ihre Intensität ist im Allgemeinen der Intensität der in den Ankern inducirten Ströme, also bei gleichen Dimensionen deren Leitungsfähigkeit proportional[2]). Dreht man den Commutator allmählich auf der Rotationsaxe des Ankers, so kann man in dem Galvanometer die Ströme messen, welche inducirt sind, während der Anker entweder dicht vor den Polen N und S der hufeisenförmigen Spirale oder in anderen Phasen seiner Bewegung sich um 20 oder 35° dreht.

Steht der Anker bei seiner Drehung gleich viel Grade vor oder hinter den Polen N und S, z. B. in den Lagen AB und $A_1 B_1$, Fig. 99 (a. f. S.), so werden bei der Annäherung an die Seite CDE und bei der Entfernung von der Seite EFC der Drahtwindungen der hufeisenförmigen

---

1) Verdet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 31, p. 187, 1851*; Krönig's Journ. 1, p. 364*. — 2) Vergl. auch Breguet, Compt. rend. 23, p. 1155, 1846*.

Spirale nach dem Lenz'schen Gesetze in dem Anker Ströme inducirt, welche durch ihre Wechselwirkung mit den Solenoïdpolen seine Bewegung zu hemmen streben, deren Intensität in der den Polen N und S zunächst liegenden Seite im Maximum ist, und die sich in den ferneren Theilen des Ankers ausgleichen. Die Richtungen dieser Ströme sind also in dem Anker bei der Annäherung und Entfernung von den Polen entgegengesetzt.

Fig. 99.

Da aber bei der Annäherung des Ankers aus der Lage AB an den Pol N die Intensität des in ihm inducirten Stromes zunimmt, bei der Entfernung von demselben aus der Lage $A_1 B_1$ aber abnimmt, so müssten in beiden Fällen in der Inductionsspirale durch diese Intensitätsänderungen gleichgerichtete und gleich starke Ströme inducirt werden. Dieselben sollten ein Maximum der Intensität besitzen, wenn sich der Anker in der Nähe der Pole der Spirale befindet, und bis zu seiner äquatorialen Lage allmählich abnehmen.

Dieselbe Gleichheit würde sich ergeben, wenn man den Commutator so stellt, dass er bei der Drehung des Ankers um je 20 oder 35° in gleichen Winkelabständen von der axialen Lage die inducirten Ströme auffängt, einmal während der Anker sich jener Linie nähert und dann von ihr entfernt. Die ersteren Winkelabstände wollen wir mit —, die anderen mit + bezeichnen.

Diese Gleichheit tritt indess nur bei langsamen Rotationen ein, bei schnelleren verschiebt sich das ganze Phänomen im Sinne der Rotation, so dass das Galvanometer das Maximum der Ablenkung zeigt, wenn man den Commutator so stellt, dass er ihm die Ströme zuführt, welche erst einige Zeit nach dem Vorbeigehen des Ankers vor den Magnetpolen inducirt worden sind.

Auf diese Weise fand z. B. Verdet folgende Ablenkungen, als der Anker resp. I 5, II 20, III 40 Umdrehungen in der Secunde machte:

Drehung des Ankers von	Silber			Zinn		
	I	II	III	I	II	III
— 60° bis — 40°	+ 2	+ 4	+ 28	„	+ 2	+ 3
— 40 bis — 20	+ 7	+ 30	+ 35	+ 1,5	+ 4	+ 11
— 20 bis 0	— 12	+ 29	+ 45	— 1	— 2	+ 4
0 bis + 20	— 26	— 66	+ 90	— 2	— 18	— 30
+ 20 bis + 40	+ 2	— 62	— 90	+ 2	— 2	— 18
+ 40 bis + 60	+ 4	+ 36	— 9	+ 2	+ 16	+ 32

Aehnliche Resultate ergaben sich bei Ankern von anderen Metallen, wie Kupfer, Zink, Blei, auch von Antimon und Wismuth. — Bei letzteren Metallen wurde die hufeisenförmige Spirale durch einen Stahlmagnet ersetzt, dessen Magnetismus zugleich durch die Ströme, welche in seiner Masse indirect von den im Anker inducirten Strömen inducirt werden, verändert wird, und der so wiederum in den seine Schenkel umgebenden Inductionsspiralen Ströme inducirt. Die letzteren sind dabei intensiver, als bei Anwendung der Spirale, indess ist der Gang der Erscheinungen derselbe.

Stets verschoben sich die Lagen des Ankers, in denen der in den Inductionsspiralen inducirte Strom seine Richtung wechselte, mit wachsender Drehungsgeschwindigkeit immer mehr im Sinne der Bewegung, so dass der Einfluss der Zeit auf die Induction wiederum bewiesen ist. — Diese Erscheinung tritt bei den besser leitenden Metallen viel stärker hervor.

386 Ebenso wie in den §. 375 u. flgde. beschriebenen Versuchen die elektromagnetische Wirkung der Ströme, welche durch einen Magnet in einer in seiner Nähe rotirenden Metallscheibe inducirt werden, auf die Bewegung des Magnetes einen Einfluss ausübt, kann auch umgekehrt der Magnet in Rotation versetzt, und über oder zwischen seinen Polen eine Metallmasse frei aufgehängt werden. Auch diese folgt durch die in ihr erzeugten Inductionsströme der Bewegung des Magnetes [1]).

Zur Anstellung dieser Versuche befestigt man auf der verticalen Axe einer Centrifugalmaschine oder eines Uhrwerkes einen starken hufeisenförmigen Stahlmagnet, so dass seine Schenkel vertical sind, und bringt über seinen Polflächen einen Glaskasten an, in welchem man an einem dünnen Faden die zu untersuchenden Körper zwischen oder über die Magnetpole hängt. — Will man den Stahlmagnet durch einen dauernd gleichartig magnetisirten Elektromagnet ersetzen, so muss man die Enden der ihn magnetisirenden Drähte mit zwei isolirt auf die Drehungsaxe aufgesetzten Metallscheiben verbinden, gegen welche zwei mit den Polen der Säule verbundene Federn schleifen.

Hängt man über den Polen des rotirenden Magnetes horizontale Scheiben aus verschiedenen Metallen auf, so kann man zeigen, dass die Kraft, welche sie aus der, ihnen durch die Torsion des Aufhängungsfadens ertheilten Lage ablenkt, mit ihrer Leitungsfähigkeit und der Drehungsgeschwindigkeit des Magnetes proportional wächst; dass, wenn die Torsion des Aufhängungsfadens gering ist, die Scheiben im Sinne

---

[1]) Herschel und Babbage, l. c. Vergl. auch die Methode von Boys und Guthrie zur Bestimmung der Leitungsfähigkeit von Flüssigkeiten Bd. I, §. 460*.

der Drehungsrichtung des Magnetes in Rotation versetzt werden; dass radial ausgeschnittene Scheiben um so weniger durch den rotirenden Magnet abgelenkt werden, je mehr Ausschnitte sie haben, dass beim Zulöthen der Ausschnitte die Ablenkung oder Rotation um so stärker wieder hervortritt, je besser das dazu verwendete Loth leitet u. s. f.

Analog zeigte Christie[1]), dass Scheiben, welche kreisförmige Einschnitte haben, so dass ihre ringförmigen Theile nur an einigen, um einen bestimmten Winkel von einander entfernten Stellen zusammenhängen, um so schwächer der Rotation folgen, je mehr solcher Einschnitte in ihnen angebracht sind.

Wird bei diesen Versuchen der Abstand der rotirenden Magnetpole von der Drehungsaxe vergrössert, so nehmen die in einer darüber schwebenden Kupferscheibe inducirten Ströme an Intensität zu, da die Geschwindigkeit der Bewegung der Pole wächst. Zugleich wirkt auch die zwischen den inducirten Strömen und Magneten thätige, die Scheibe bewegende elektromagnetische Kraft an einem grösseren Hebelarm, und so wird die Ablenkung und Rotation der Scheibe bedeutender. Diese Zunahme erreicht indess ein Maximum, indem, wenn die Magnetpole zu nahe am Rande der rotirenden Scheibe liegen, die inducirten Ströme sich mehr gegen ihre Mitte hin ausbreiten, und sich so die tangentiale Componente ihrer Wechselwirkung mit den Magnetpolen vermindert (vergleiche §. 383). Nach Christie würde bei einer Scheibe von 8,4 Zoll Radius, unter der zwei verticale Magnetstäbe von je 12 Zoll Länge in einem Abstande von 1 Zoll rotiren, eine Entfernung der Magnetpole von der Rotationsaxe von 3,2 Zoll das Maximum der Wirkung ergeben.

Hängt man nach Matteucci[2]) zwischen den Polen des rotirenden Magnetes eine massive oder eine hohle Kupferkugel an einem Faden auf, so drehen sich beide unter sonst gleichen Verhältnissen gleich schnell.

387 Je mehr die Continuität der Metallmassen vermindert wird, desto schwächer werden die in ihnen im Ganzen entwickelten Inductionsströme; desto weniger folgen sie der Rotation des Magnetes. Indess schon sehr kleine Theilchen Metall, z. B. Goldstäubchen, welche an den beiden Enden eines horizontal zwischen den Magnetpolen aufgehängten Glasfadens angeklebt sind, vermitteln bei der Rotation des Magnetes auch die Drehung des Glasfadens.

Gemenge von Harz mit Gold- und Silberstäubchen, welche etwa $^1/_{10}$ bis $^1/_{100}$ mm Durchmesser besitzen, zeigen, wenn sie an einem Faden zwischen den Polen des rotirenden Magnetes aufgehängt werden, gleich-

---

[1]) Christie, Phil. Trans. 1827, 1, p. 71*. — [2]) Matteucci, Ann. de Chim. et de Phys. 39, p. 135, 1853*.

falls die Rotation. Bei gleichem Gewicht des in die Harzmasse eingestreuten Pulvers soll dieselbe mit wachsender Feinheit des Pulvers entgegen der Erwartung wieder schneller werden. Matteucci schreibt dies einer stärkeren wechselseitigen Induction der kleineren, also näher an einander liegenden Metalltheilchen auf einander zu. — Die Erscheinung könnte aber auch von einem Eisengehalt in Folge der Darstellung der Pulver herrühren.

Besitzen die zwischen die Magnetpole gehängten Körper nach verschiedenen Richtungen verschiedene Leitungsfähigkeit, so ist die Intensität der Inductionsströme, welche durch den um eine verticale Axe rotirenden Hufeisenmagnet in ihnen erzeugt werden, grösser, wenn die Körper in verticalen Ebenen besser leiten als in horizontalen, und die Inductionsströme wesentlich in ersteren fliessen. In diesem Falle tritt daher auch die Ablenkung und Rotation der Körper stärker hervor. 388

Hängt man z. B. einen Würfel von Wismuth mit verticalen Spaltungsflächen zwischen den Polen eines Elektromagnetes auf, welcher um eine zwischen seinen verticalen Schenkeln befindliche verticale Axe rotirt, so rotirt der Würfel um letztere schneller, als wenn die Spaltungsflächen in ihm horizontal liegen, da die Leitungsfähigkeit des Wismuths parallel den Spaltungsflächen grösser ist, als senkrecht gegen dieselben. Ganz ähnlich verhält sich ein Würfel aus dünnen Kupferplatten, welche durch einen Isolator von einander getrennt sind. Derselbe rotirt nur, wenn die Platten vertical, nicht aber, wenn sie horizontal sind.

In ähnlicher Weise hat Matteucci[1]) gleich grosse rechteckige Platten aus Wismuthstücken von je 2,56 g Gewicht, 16,9 mm Länge, 9,3 mm Breite und 1,75 mm Dicke geschnitten, in denen die Spaltungsrichtung einmal a) der längeren, und dann b) der kürzeren Kante parallel war. Je vier dieser Platten wurden auf die vier verticalen Seiten eines, zwischen den Polen des rotirenden Magnetes aufgehängten Holzwürfels so aufgeklebt, dass ihre Längsrichtung horizontal lag. Der Würfel mit den Platten *a* folgte dem rotirenden Magnet viel langsamer als der Würfel mit den Platten *b*.

In einer eigenthümlichen Weise erregt Baily[2]) die Rotation einer Metallscheibe unter elektromagnetischem Einfluss. Bringt man unter einer horizontal aufgehängten leitenden Scheibe zwei gleichnamige Magnetpole an, lässt den einen unverändert und verstärkt oder schwächt den anderen, so bewegt sich die Scheibe in Folge der durch letzteren Vorgang inducirten Ströme von dem constanten Pole zum veränderten 389

---

[1]) Matteucci, l. c. — [2]) Baily, Phil. Mag. [5] 8, p. 286, 1879*; Beibl. 4, p. 75, 1880*.

oder umgekehrt. Sind die Pole ungleichnamig, so findet das Entgegengesetzte statt. Wird der eine Pol geschwächt, der andere verstärkt, so addiren sich die Wirkungen. Werden daher im Kreise herum unter der Scheibe verticale Elektromagnete angebracht und deren Ströme in geeigneter Weise abwechselnd erregt und unterbrochen, so kann man dadurch die Scheibe in Rotation versetzen.

390 Die elektromagnetische Wirkung der Ströme, welche bei der Veränderung der gegenseitigen Lage von Magneten und Metallmassen in letzteren inducirt werden, zeigt sich auch darin, dass durch dieselben die den Metallmassen oder Magneten ertheilten Bewegungen gehemmt werden [1]).

Lässt man z. B. eine kupferne Kugel, welche in ein Gyroskop oder in den Ring einer Bohnenberger'schen Maschine eingesetzt oder an einem Faden aufgehängt ist, den man stark gedrillt hat, zwischen den Polen eines Magnetes rotiren, so werden in ihr Ströme inducirt, die denen in der Arago'schen Scheibe völlig analog sind und daher die Bewegung der Kugel hemmen und ihre Drehung verlangsamen. — Versetzt man in gleicher Weise zwischen den, auf einen starken Elektromagnet aufgelegten Halbankern vermittelst einer Kurbel eine, auf eine Axe gesetzte Kupferscheibe von etwa 10 mm Dicke und 30 mm Durchmesser in der äquatorialen Ebene in Rotation, so bemerkt man deutlich bei Erregung des Magnetes, dass man zur Drehung der Scheibe eine bedeutendere Kraft anwenden muss. Die die Bewegung hemmenden Inductionsströme erzeugen in der Kupferscheibe eine gewisse Wärmemenge, welche bei schneller Rotation bedeutend genug werden kann, um bei Berührung der Scheibe mit der Hand wahrgenommen zu werden [2]).

Fig. 100.

Zu diesem Versuche eignet sich namentlich eine Scheibe von Aluminium sehr gut, da sie bei ihrem geringen Gewicht schon durch eine kleine Wärmemenge sehr stark erhitzt wird. Die grosse specifische Wärme des Aluminiums (die doppelte des Kupfers) compensirt diese Wirkung nicht ganz [3]).

Lässt man zwischen den Polen des Elektromagnetes durch einen Schnurlauf vermittelst einer Centrifugalmaschine einen kleinen, verticalen Cylinder von dünnem Kupferblech, Fig. 100, rotiren, der mit leicht

[1]) Faraday, Exp. Res. Ser. 22, §. 2514, 1848; Anm.* — [2]) Foucault, Compt. rend. 41, p. 450, 1855*; Pogg. Ann. 96, p. 622*. Richtige Erklärung von Poggendorff, ibid. p. 624*. Die Bezeichnung der hierbei auftretenden, seit langer Zeit bekannten Ströme als „Foucault'sche Ströme" ist nicht gerechtfertigt. — [3]) Violle, Compt. rend. 71, p. 270, 1870*.

schmelzbarem Metallgemisch gefüllt ist, so kann dasselbe in Folge der freigewordenen Wärme schmelzen [1]).

391 Der folgende Versuch von Sturgeon [2]) zeigt in anderer Form dieselbe Wirkung. Man lässt eine kreisförmige Kupferplatte, welche auf der einen Seite ein kleines Uebergewicht hat, um eine, auf ihrer Ebene senkrechte Axe in der Verticalebene Pendelschwingungen vollführen. Bringt man gegenüber den beiden Flächen der Platte zwei entgegengesetzte Magnetpole an, so induciren beide in den an ihnen vorbeischwingenden Theilen der Platte Ströme, welche gleiche Richtung besitzen und durch ihre elektromagnetische Wirkung auf die Magnetpole die Platte in ihren Schwingungen aufhalten, so dass ihre Elongationen sehr viel schneller bei Anwendung der Magnete, als ohne dieselben abnehmen. Nähert man dagegen den beiden Flächen der schwingenden Platte die Magnete mit gleichnamigen Polen, so heben sich die durch dieselben inducirten Ströme auf, wenn die Pole gleich stark magnetisch sind, sie hemmen die Schwingungen der Scheibe nicht.

392 Die Inductionsströme in einer zwischen zwei Magnetpolen rotirenden Metallscheibe erzeugen auch rückwärts in der Masse des Magnetes und den etwa seine Schenkel umgebenden Drahtspiralen Inductionsströme. Wächst die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe, so nimmt die Intensität der Ströme darin zu, die in dem Magnet und seinen Spiralen dadurch inducirten Ströme sind den magnetisirenden entgegengerichtet, der Magnetismus des Magnetes nimmt ab; er bleibt sodann bei constanter Drehungsgeschwindigkeit constant und wächst wieder bei Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe, da nun die Inductionsströme in derselben schwächer werden. Umgiebt man den Magnet mit einer Drahtspirale und ertheilt ihm entweder durch einen vorübergehend durch dieselbe geleiteten Strom permanenten Magnetismus oder magnetisirt ihn durch einen, eine besondere Spirale durchfliessenden, schwachen Strom dauernd temporär, so kann man diese secundären Inductionen bei Verbindung der erst erwähnten Spirale mit einem Galvanometer bei abwechselnder schnellerer und langsamerer Rotation der Scheibe nachweisen [3]) (vergl. §. 385).

Rotirt eine Kupferscheibe in der Art zwischen den Halbankern eines Magnetes, dass die Axe der letzteren mit der Rotationsaxe der Scheibe zusammenfällt, so bewirkt die Induction nur eine elektrische

[1]) Tyndall, On Heat. 1. Aufl., p. 36, 1865*; deutsche Uebersetzung, 2. Aufl., p. 48, Fig. 16*. — [2]) Sturgeon, Edinb. Phil. Journ. 1825, p. 124*. Ein ganz ähnlicher Apparat, in welchem die Schwingungen eines an einer Pendelstange befestigten Metallbogens zwischen den Magnetpolen gedämpft werden, von von Waltenhofen, Wied. Ann. **19**, p. 928, 1883*. — [3]) Jacobi, Compt. rend. **74**, p. 237, 1872*. Auch Violle, Compt. rend. **70**, p. 1283*, **71**, p. 270, 1870*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **21**, p. 74, 1870*. Aehnlich auch schon Soret, Compt. rend. **65**, p. 301, 1857*.

Spannung zwischen den centralen und peripherischen Stellen der Scheibe; es entstehen aber keine geschlossenen Ströme. Zur Drehung der Scheibe ist daher keine weitere Arbeit, als zur Ueberwindung der Reibung, erforderlich. Verbindet man dagegen das Centrum und die Peripherie der Scheibe durch eine leitende Schliessung, so gleichen sich die in der Scheibe entstehenden Ströme aus, und der aus ihrer Wechselwirkung mit dem Magnet entstehende Widerstand gegen die Bewegung muss durch eine Arbeit überwunden werden [1]).

393 Endlich wirken auch die Inductionsströme in einer ruhenden Metallmasse hemmend auf die Bewegungen des inducirenden Magnetes.

Schwingt eine Magnetnadel frei in der Luft, so nehmen die Schwingungsbogen in Folge des Luftwiderstandes und der Reibung langsam ab. Lässt man aber die Nadel in einem massiven Ringe von Metall oder über einer dicken Metallscheibe, z. B. von Kupfer, schwingen, so vermindern sie sich sehr schnell [2]). — Ueber einer schlecht leitenden Platte findet dies nicht statt. So beobachtete z. B. Seebeck [3]), dass die Schwingungsweite einer Declinationsnadel, welche über einer Marmorplatte aufgestellt war, bei 116 Schwingungen von 45° auf 10° herabsank, während sich die Oscillationsweite schon bei 61 Schwingungen um ebenso viel verminderte, wenn dieselbe in einem dicken Kupferringe oscillirte. — Diese Beobachtung führte Arago (l. c.) zuerst auf die Entdeckung des Rotationsmagnetismus.

Beim Schwingen der Magnetnadel nähern sich ihre Pole bestimmten Theilen der Kupferscheibe und entfernen sich von anderen. In allen diesen Theilen entstehen Inductionsströme, welche durch ihre elektromagnetische Wirkung auf die Pole der Nadel ihre Bewegungen aufzuhalten streben. Die Nadel wird so allmählich zur Ruhe gebracht. Man bezeichnet diese schnellere Abnahme der Schwingungsweiten der Nadel mit dem Namen der Dämpfung ihrer Schwingungen.

Bedient man sich statt grösserer Metallplatten schmaler Metallstreifen, so dämpfen diese nur dann die Schwingungen der Magnetnadel, wenn sie parallel unter ihr liegen; denn nur in diesem Falle können in ihnen die dämpfenden Inductionsströme entstehen [4]).

Legt man unter die Magnetnadel horizontale kupferne Ringe, so dämpfen sie die Schwingungen weniger, als unter sie gelegte Blechstreifen und Kupferplatten, da auch hier die Inductionsströme schwächer auf die Nadel wirken.

Macht man in die unter die Nadel gelegten Metallplatten Einschnitte, so wird wegen der Hinderung der Entwickelung der Inductionsströme in ihnen ihre hemmende Wirkung geschwächt [5]).

---

[1]) Le Roux, Compt. rend. 75, p. 1805, 1872*. — [2]) Arago, Ann. de Chim. et de Phys. 27, p. 363, 1824*, 32, p. 213, 1826*. — [3]) Seebeck, Pogg. Ann. 7, p. 203, 1826*, 12, p. 352, 1828*. — [4]) Seebeck, l. c. — [5]) Baumgartner, Baumgartner u. Ettingshausen's Zeitschr. für Phys. u. Math. 2, p. 430, 1827*.

Ueber Kupferfeilspänen findet kaum eine schnellere Abnahme der Schwingungen statt, als in der Luft, da in der wenig continuirlichen Masse die Intensität der inducirten Ströme zu gering ist.

Lässt man Magnetstäbe, welche an ihrem einen Ende an einen Faden geknüpft sind, in einer verticalen Ebene über einer horizontalen Kupferscheibe pendelartig schwingen, so werden ebenso ihre Oscillationsweiten durch die in der Scheibe entstehenden Inductionsströme vermindert[1]).

Wir haben schon Bd. III, §. 238 die Abnahme der Schwingungsweiten einer Magnetnadel berechnet, welche durch einen, der Geschwindigkeit ihrer Bewegung proportionalen Widerstand aufgehalten wird. Wir hatten dabei (Gleichung 11) folgende Formel gefunden: 394

$$\lambda = \varepsilon T_1,$$

wo λ das logarithmische Decrement der Schwingungen (die Differenz der Logarithmen zweier auf einander folgender Schwingungsbogen), T_1 die Schwingungsdauer unter Einfluss der verzögernden Kraft, ε eine Constante ist, welche der verzögernden Kraft entspricht, welche die Nadel bei der Geschwindigkeit Eins in ihrer Bewegung aufhält.

Bestimmt man das logarithmische Decrement der Schwingungen der Nadel über einer Metallplatte im luftleeren Raume bei verschiedenen Oscillationsweiten, so erweist sich dasselbe constant. Die dämpfende Kraft ist also der Geschwindigkeit der Bewegung der Magnetnadel proportional. Dies lässt sich auch von vornherein erwarten, da die Intensität der Inductionsströme, welche in der unter der Nadel befindlichen Platte inducirt werden, der relativen Geschwindigkeit der Magnetnadel und der einzelnen Theile der Platte proportional ist.

Auch direct zeigt dies ein Versuch von Baumgartner (l. c.). Eine 3 Zoll lange-Nadel war so schwach magnetisirt, dass sie, an einem dünnen Faden hängend, eine Schwingungsdauer von 24 Secunden hatte. Ihr Magnetismus war so gering, dass die Abnahme ihrer Schwingungsbogen in der Luft und über einer Kupferplatte nahezu gleich war. Wurde aber die Nadel an einem bandförmig gewalzten Messingdraht aufgehängt, so dass sie in Folge der Elasticität desselben eine Schwingungsdauer von nur 0,56 Secunden besass, so nahm ihr Schwingungsbogen ohne Einwirkung der Kupferplattte während 160, in der Nähe derselben schon während 64 Schwingungen von 20° bis 10° ab.

Die Intensität der Inductionsströme wächst ferner mit der Zunahme des Momentes der Nadeln, also auch die dämpfende Wirkung derselben. Deshalb wird auch eine magnetische Nickelnadel durch umgebende Metallmassen schwächer in ihren Schwingungen aufgehalten, als eine Stahlnadel[2]).

---

[1]) Seebeck, l. c. — [2]) Seebeck, l. c.

395 Da die Intensität der Inductionsströme der relativen Leitungsfähigkeit der Scheiben proportional ist, über denen die Nadel schwingt, so muss die Constante ε, d. h. das durch die Schwingungszeit T_1 dividirte logarithmische Decrement der Leitungsfähigkeit der Scheibe direct proportional sein.

Schwingt die Nadel in der Luft, so ruft der Luftwiderstand eine der Geschwindigkeit der Oscillationen der Nadel proportionale verzögernde Kraft ε_1 hervor. Unter dem Einflusse derselben mache die Nadel n Schwingungen, ehe sie vom Ausschlage A auf den Ausschlag B kommt. Ihre Schwingungsdauer sei T_1. Schwingt die Nadel nachher in der Luft über zwei verschiedenen Metallplatten, welche für sich die, ihren Leitungsfähigkeiten proportionalen verzögernden Kräfte ε_2 und ε_3 auf die Nadel ausüben, so ist die ganze auf die Nadel wirkende, verzögernde Kraft in beiden Fällen $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ und $\varepsilon_1 + \varepsilon_3$. Ist dann die Zahl der Schwingungen, während welcher der Ausschlag der Nadel von A auf B abnimmt, n_2 und n_3, sind ihre Schwingungsdauern T_2 und T_3, so hat man

$$\log B - \log A = n_1 \varepsilon_1 T_1 = n_2 (\varepsilon_2 + \varepsilon_1) T_2 = n_3 (\varepsilon_3 + \varepsilon_1) T_3.$$

In den meisten Fällen kann man die Schwingungsdauern T_1, T_2, T_3 nahezu als gleich ansehen, wie dies auch Versuche von Seebeck (l. c.) ergeben, bei denen er eine Nadel von $2^7/_8$ Zoll Länge über einer bis sechs viereckigen Kupferplatten von 5 Zoll Kante, über einer Marmorplatte und einem mit Papier bedeckten, mit Baumwachs und Eisenfeilen bestrichenen Papierblatte schwingen liess. Die Dauer von 12 Schwingungen innerhalb der Elongationen 45° und 10° schwankte nur zwischen 20 Secunden 29,6 Tertien und 20 Secunden 38,6 Tertien.

Setzt man $T_1 = T_2 = T_3$, so erhält man:

$$\varepsilon_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_2} \varepsilon_1; \qquad \varepsilon_3 = \frac{n_1 - n_3}{n_3} \varepsilon_1,$$

also

$$\varepsilon_2 : \varepsilon_3 = \frac{n_1 - n_2}{n_2} : \frac{n_1 - n_3}{n_3}.$$

Aus dieser Gleichung lässt sich das Verhältniss der den Werthen ε_2 und ε_3 proportionalen Leitungsfähigkeiten der Scheiben berechnen [1]. — So fand Seebeck die Zahl z der Schwingungen, während der Ausschlag einer Magnetnadel über mehreren, $^1/_2$ Linie dicken Platten von verschiedenen Stoffen von 45° auf 10° herabsank, über einer

[1]) Vergl. auch Harris, Phil. Trans. 1831, 1, p. 67*. Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 44, p. 172, 1855*.

	z	l
Marmorplatte	116	—
Kupferplatte	26	100
Platte aus 1 Thl. Antimon und 3 Thln. Kupfer	105	3
Platte aus 3 Thln. Antimon und 1 Thl. Kupfer	100	4,6
Platte aus 1 Thl. Wismuth und 3 Thln. Kupfer	94	6,8
Platte aus 3 Thln. Wismuth und 1 Thl. Kupfer	104	3,3

Die unter l verzeichneten Zahlen geben die aus den Zahlen z berechneten relativen Leitungsfähigkeiten an.

Lässt man eine Magnetnadel über glühenden Metallscheiben schwingen, so beobachtet man eine schwächere Wirkung, da das Leitungsvermögen der Scheiben bei der hohen Temperatur bedeutend abnimmt[1]).

Aehnliche Versuche von Arago (l. c.), welche eine dämpfende Wirkung auch bei Platten von Eis und Crownglas, von Baumgartner (l. c.), welche sie bei Ringen von Marmor, Holz, Sandstein, Glas, destillirtem Wasser nachweisen sollten, welche die schwingende Magnetnadel umgeben, sind nicht ganz zuverlässig und theils durch leitende Feuchtigkeitsschichten auf den Platten, theils auch namentlich bei der grossen Nähe derselben an der oscillirenden Magnetnadel durch den Luftwiderstand bedingt. Jedenfalls sind die Wirkungen äusserst gering.

396 Mit der Entfernung der Magnetpole von den in ihrer Nähe befindlichen Metallmassen nimmt die Intensität der Inductionsströme in denselben ab, also auch die dämpfende Rückwirkung derselben auf die schwingende Nadel. Um dies nachzuweisen kann man den folgenden Apparat[2]) verwenden. An einem runden Messingstab, der auf einem Grundbrett mit drei Stellschrauben steht, lässt sich eine Kupferscheibe auf- und abschieben und beliebig feststellen. Der Stab hat oben eine Spitze zum Aufsetzen einer stark magnetischen Nadel. Bei heruntergelassener Scheibe ist die Schwingungsdauer grösser. Man kann auch am Stabe zwei Scheiben anbringen, zwischen denen die Nadel schwingt[3]).

Als Harris (l. c.) eine Magnetnadel in einem von 12 concentrischen Ringen (1 bis 12), welche je 0,025 Zoll dick waren und genau in einander passten, schwingen liess, fand er nach der §. 395 entwickelten Formel die dämpfende Kraft des Ringes:

---

[1]) Vergl. indess de Haldat, Ann. de Chim. et de Phys. **39**, p. 232, 1828*; Pogg. Ann. **14**, p. 598*. — [2]) G. Krebs, Carl's Rep. **17**, p. 659, 1881*; Beibl. **6**, p. 38*. — [3]) Versuche von Saigey, Bullet. des Sciences 1828, p. 33*; Pogg. Ann. **15**, p. 88*, nach denen die hemmende Wirkung einer Platte in geometrischer Reihe abnimmt, wenn der Abstand in arithmetischer Reihe wächst, sind nicht beweisend. Vergleiche auch Baumgartner, Baumgartner u. Ettings-

Ring	1	2	3	4	6	8
	8,54	4,52	3,45	2,38	1,53	1,00

Wirken gleichzeitig mehrere Ringe, so addirt sich ihre dämpfende Wirkung, so dass die Inductionswirkung auf die äusseren Ringe durch das zwischenliegende Kupfer der inneren Ringe nicht gehemmt wird.

Das analoge Resultat erhielt Moser[1]), als er vor einer Magnetnadel ein bis vier gleich grosse Kupferscheiben einzeln oder an einander geschichtet aufstellte, und nun die Schwingungszahlen der Nadel zählte, in denen sich ihre Elongationen um gleich viel verringerten. Die Elongationen wurden dabei an dem Fadensysteme im Ocular des Fernrohres abgelesen, welches zur Beobachtung des Standes der Nadel diente.

Da indess beim Aufeinanderlegen mehrerer dämpfender Scheiben der Abstand der entfernter liegenden von den Magnetpolen immer mehr zunimmt, so erreicht man bald eine Grenze, bei welcher eine Vermehrung ihrer Zahl nicht mehr die Dämpfung verstärkt[2]).

So fand Seebeck (l. c.) die Zahl der Schwingungen einer Nadel, während deren ihre Elongationen von 45° auf 10° sich verminderten, über

1	2	3	4	6	7 bis 45 Kupferplatten
26	$17^1/_2$	14	13	12	11

Dasselbe ergiebt sich, wenn man statt einer dünnen Platte immer dickere anwendet[3]).

Man benutzt die Dämpfung der Schwingungen der Magnetnadel durch Metallmassen bei vielen zur Messung der Stromintensität und des magnetischen Momentes bestimmten Apparaten, bei welchen man eine schnelle Einstellung einer Magnetnadel in ihre Ruhelage bewirken will. — Je schneller diese Einstellung erfolgen soll, desto bedeutender muss die

---

hausen's Zeitschrift 2, p. 426, 1827*. — Die Einwirkung von Metallplatten auf das logarithmische Decrement der Schwingungen von Magnetstäben, welche in verschiedener Entfernung von ihnen schwingen, hat auch Abria (Compt. rend. 53, p. 964, 1861*; Ann. de Chim. et de Phys. 65, p. 217, 1862*) bestimmt, indem er einmal horizontale Stäbe zwischen verticalen Platten, deren Ebenen auf der Axe der Stäbe vertical standen, und dann über horizontalen Platten schwingen liess. Die von den Platten ausgehenden Kräfte φ und ψ, drückt er in beiden Fällen durch die empirischen Formeln

$$\text{(I)}\quad \varphi = \frac{N}{e^{\alpha x}\, x^{1,393}}, \qquad \text{(II)}\quad \psi = \frac{P}{e^{\alpha y} y^b \left(1 + tg\,\frac{\pi}{2}\,a y\right)}$$

aus, wo N und P dem Moment der Nadeln, der Dicke und Leitungsfähigkeit der Platten proportionale Constante sind, a eine mit dem Durchmesser der Platten wachsende Constante ist, x und y den Abstand der Axe der Nadel, resp. von einer 0,43 der Dicke unter der Oberfläche der verticalen oder 0,33 der Dicke unter der Oberfläche der horizontalen Platten liegenden Schicht bedeutet, $\alpha = 0,427\, a$ ist. Bei Platten von Kupfer, Zink und Quecksilber findet Abria das Verhältniss der Kräfte φ wie 49,5 : 13,4 : 1.

[1]) Moser, Dove's Rep. 2, p. 126, 1838*. — [2]) Seebeck, Pogg. Ann. 7, p. 211, 1826*. — [3]) Vergl. Baumgartner, l. c. p. 427*.

Dämpfung sein. Man lässt deshalb die Magnetnadel nicht nur über einer Kupferscheibe schwingen, sondern umgiebt sie von allen Seiten mit einer kupfernen Hülle, wie z. B. bei den Bd. III, §. 297 u. flgde. beschriebenen Apparaten[1]). Dass dabei die Schwingungen zuletzt auch aperiodisch werden können, haben wir schon Bd. III, §. 244 erwähnt.

397 Auch durch den Erdmagnetismus lassen sich in körperlichen Leitern inducirte Ströme erzeugen. Rotirt z. B. eine Kupferplatte in einer horizontalen Ebene oder, noch besser, in der auf der Richtung der Inclinationsnadel senkrechten Ebene, und verbindet man ihre Axe und ihren Rand durch amalgamirte Federn, welche gegen dieselben schleifen, mit einem Galvanometer, so giebt der Ausschlag seiner Nadel an, dass, wenn die Scheibe in der Richtung des Uhrzeigers rotirt, in ihr Ströme inducirt werden, welche von ihrem Centrum zu ihrer Peripherie fliessen. Dieselben kehren bei entgegengesetzter Rotation der Scheibe ihre Richtung um, wie wenn sich ein Südpol eines Magnetes unter der Platte befände[2]). — Diese Richtung der Ströme ergiebt sich, wenn man sich vorstellt, dass der Erdstrom in der auf der Inclinationsnadel normalen Ebene von Ost durch Süd nach West fliesst. Die Richtung der inducirten Ströme ist dann die, dass sie durch ihre Wechselwirkung mit dem Erdstrom die Rotation der Metallscheibe zu hemmen streben.

Fällt die Ebene der rotirenden Scheibe mit dem magnetischen Meridian zusammen, oder fällt auch nur die Richtung der Inclination in ihre Ebene, so entstehen in ihr keine Inductionsströme.

398 Lässt man eine Kugel von Messing oder Kupfer unter dem Einfluss des Erdmagnetismus rotiren, so dass ihre Rotationsaxe mit der Inclinationsrichtung zusammenfällt, so werden in ihr Ströme inducirt, welche von ihren Polen zu ihrem Aequator oder umgekehrt fliessen und sich daher nur ausgleichen können, wenn man erstere und die am Aequator liegenden Punkte leitend verbindet. — Bildet die Rotationsaxe einen Winkel mit der Inclinationsrichtung, so werden gleichfalls in der Kugel Ströme inducirt, welche den durch einen Kreisstrom, Fig. 85 und 86, §. 362, inducirten völlig analog sind[3]). Ihre Richtung ergiebt sich im Allgemeinen, wenn man sich die Lage des Erdstromes vergegenwärtigt. Rotirt die Kugel z. B. um eine von Ost nach West gerichtete Axe, so dass ihre nördlich gelegenen Punkte über ihre obere Seite nach Süden gehen, so entsteht in denselben, wenn sie sich auf der südlichen Seite der auf der Inclinationsrichtung senkrechten Ebene des Erdstromes nähern, ein Strom von West nach Ost; wenn sie sich von derselben bei weiterer Drehung entfernen, ein Strom von Ost nach West. Umgekehrt

---

[1]) Zuerst von Gauss angewendet. Resultate des magnetischen Vereins 1837, p. 18*. — [2]) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 149 u. f. 1832*. — [3]) Faraday, Exp. Res. Ser. 2, §. 160 u. flgde. 1832*.

fliessen auf der nördlichen Seite der Kugel in den sich der Ebene des Erdstromes nähernden Theilen der Kugel Inductionsströme von Ost nach West, in den sich von derselben entfernenden Theilen Ströme von West nach Ost. Indem die beim Annähern und Entfernen inducirten Ströme sich zu geschlossenen Bahnen vereinen, wirken sie auf eine der Kugel genäherte Magnetnadel, wie wenn die Kugel in der Ebene des Erdstromes auf ihrer südlichen Seite einen magnetischen Südpol, auf der nördlichen einen Nordpol erhalten hätte. — Rotirt ebenso die Kugel um eine in der magnetischen Meridianebene liegende, auf der Inclinationsrichtung senkrechte Axe, so dass ihre oberen Punkte von Ost nach West laufen, so zieht sie den Südpol der östlich von ihr aufgestellten Magnetnadel an, besitzt also auf der Ostseite einen Nordpol und umgekehrt auf der Westseite einen Südpol.

Faraday (l. c.) prüfte diese Resultate an einer hohlen Messingkugel von 4 Zoll Durchmesser, die an einem Metallstiel mit der Hand, sei es frei, sei es in einem Holzlager, neben einem Glascylinder gedreht wurde, in welchem an einem Coconfaden ein verticaler Strohhalm hing, in den an beiden Enden in entgegengesetzten Richtungen die beiden Hälften einer magnetischen Nähnadel in horizontaler Lage eingebohrt waren. Der Apparat wurde neben der rotirenden Kugel so aufgestellt, dass die Axen der Magnetnadeln mit dem magnetischen Meridian parallel lagen, und sich die obere Nadel mit dem Mittelpunkte der rotirenden Kugel in derselben Horizontalebene befand [1]).

399 Wir haben bisher das Verhalten rotirender Scheiben aus unmagnetischen Metallen gegen Magnetnadeln und die Dämpfung der Schwingungen der letzteren über ruhenden unmagnetischen Massen behandelt. Anders verhalten sich magnetische Massen. Wird eine Eisenscheibe unter einer frei aufgehängten horizontalen Magnetnadel in Rotation versetzt, so folgt ihr dieselbe viel schneller, als sich nach dem relativ geringen Leitungsvermögen der Scheibe erwarten liess. Ebenso werden die Schwingungen einer um eine horizontale Axe zwischen zwei Magnetpolen oscillirenden, in der Aequatorialebene befindlichen Eisenscheibe bedeutend gedämpft. Diese Wirkung wird vermehrt, wenn der Scheibe statt eines Pols, beiderseits gleichnamige Magnetpole gegenüberstehen, während die Dämpfung der Schwingungen einer Kupferscheibe im Gegentheil gesteigert wird, wenn ihr statt eines Pols beiderseits ungleichnamige Magnetpole genähert werden [2]).

Auch die Schwingungen einer Magnetnadel nehmen über einer Eisenplatte viel schneller ab, als z. B. über einer Kupferplatte. So machte

---

[1]) Ueber die Ablenkung der Magnetnadeln durch Kugeln, die in verschiedenen Richtungen unter Einfluss des Erdmagnetismus rotiren, s. auch Odstrčil, Wien. Ber. 72 [2], p. 389, Oct. 1875*. — [2]) Sturgeon, Edinb. Phil. Journ. 1825, p. 124*. Faraday, Exp. Res. 1, §. 249 u. flgde. 1831*.

bei den Versuchen von Seebeck[1]) eine Nadel über einer Marmorplatte 116 Schwingungen, ehe sich ihre Oscillationsweite von 45° auf 10° verminderte, über einer Kupferplatte von 0,3''' Dicke nur 62, über einer Eisenplatte von 0,4''' Dicke gar nur 6 Schwingungen. Dies ist wiederum ein Beweis, dass die Dämpfung nur zum geringsten Theil auf den in der Eisenplatte inducirten Strömen beruht.

Man hat früher gemeint, dass diese Erscheinungen davon herrührten, **400** dass die Pole der Magnete in den ihnen gegenüberliegenden Stellen der genäherten Eisenplatte ungleichnamige Pole erzeugten, welche eine Zeitlang andauerten, wenn auch schon die Magnetpole sich von ihnen resp. die Theile der Eisenplatte sich von den Polen entfernt hätten. Ueber der rotirenden Eisenscheibe würde also die Magnetnadel den mit ersterer vorwärts geschobenen Polen folgen, über einer ruhenden würde die oscillirende Magnetnadel gegen die hinter ihr zurückbleibenden Pole in der Eisenscheibe zurückgezogen.

Es lässt sich indess nachweisen, dass diese Ansicht nicht richtig ist, **401** worauf zuerst Warburg[2]) aufmerksam gemacht hat. So hat Himstedt[3]) einen Magnet von 10 mm im Quadrat Seite und 100 mm Länge bifilar über Scheiben und Streifen von 0,13 bis 6,4 mm dickem ausgeglühtem Eisenblech aufgehängt und in Schwingungen versetzt. An dem Magnet war senkrecht zu seiner Axe ein Messingstab von 200 mm Länge befestigt, an welchem sich Gewichte zur Veränderung des Trägheitsmomentes und der Schwingungsdauer verschieben liessen. Bei gleichem Anfangsbogen war das logarithmische Decrement (nach Abzug des der Luftdämpfung zuzuschreibenden) abweichend von der Dämpfung durch nicht magnetische Metalle (vergl. Bd. III, §. 239) unabhängig von der Schwingungsdauer. Mit der Grösse der Schwingungsbogen selbst nahm dasselbe ab.

Berechnet man nach der relativen Leitungsfähigkeit des Eisens und Kupfers aus der Dämpfung der Schwingungen über letzterem die über ersterem, so ergiebt sich, dass nur etwa $^1/_3$ Proc. derselben auf Inductionswirkungen zurückzuführen ist.

Auch spricht folgender Versuch dagegen. Unter dem Magnet wurde **402** zur Herstellung des Gleichgewichtszustandes mehrere Male eine kreisförmige Eisenscheibe um 360° hin und her gedreht, dann der Magnet festgestellt, die Scheibe zu der Zeit t schneller oder langsamer um 360° gedreht, der Magnet nach einer bestimmten Zeit T losgelassen und seine Einstellung beobachtet und dasselbe Verfahren mehrere Male bei Drehung nach verschiedenen Seiten wiederholt. Aenderte sich dabei t von 2 bis 240, T von 0 bis 1800 Secunden, so blieben doch die Ablenkungen nahezu

[1]) Seebeck, Pogg. Ann. 7, p. 207, 1826*. — [2]) Warburg, Wied. Ann. 13, p. 159, 1881*. — [3]) Himstedt, Wied. Ann. 14, p. 483, 1881*.

gleich. Wurde aber die Scheibe nach der Ablenkung erschüttert, so war die Ablenkung kleiner.

403 Demnach ist, wie Warburg (l. c.) bereits angiebt, die Erscheinung auf seine schon Bd. III, §. 485 erwähnte Beobachtung zurückzuführen, wonach auch bei wiederholten Magnetisirungen bei aufsteigenden magnetisirenden Kräften der einer bestimmten Kraft entsprechende temporäre Magnetismus kleiner ist, als bei absteigenden. Wenn der Magnet über die einzelnen Theile der Eisenplatte hinschwingt, nimmt der Magnetismus derjenigen Stellen, von denen er herkommt, ab, der Magnetismus derjenigen, zu denen er hinschwingt, aber zu. Von zweien Punkten, welche von dem Pol des Magnetes in irgend einem Moment in dem von ihm beschriebenem Kreise gleich weit entfernt sind, hat also der im Sinne der Schwingungsrichtung hinter ihm liegende einen stärkeren Magnetismus als der vor ihm liegende; der Magnet wird gegen ersteren stärker hingezogen, als gegen letzteren und so wird die Bewegung des Magnetes gehemmt.

Man kann dies direct nachweisen, wenn man nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes nach wiederholten Hin- und Herschwingungen des Magnets über der Scheibe den ihn tragenden Torsionskopf dreht und die Torsion misst, welche ihn in verschiedene Lagen einstellt. Wird dann der Torsionskopf rückwärts gedreht, bis der Magnet dieselben Lagen annimmt, so sind die Torsionen andere als vorher.

404 Aus diesen Versuchen lässt sich die Kraft, welche bei einmaligem Hin- und Herschwingen des Magnets von der Eisenplatte aus auf denselben wirkt und die ihr entsprechende Arbeit L berechnen. Ebenso kann man durch Beobachtung dreier Umkehrpunkte des Magnets die Gesammtarbeit L_1 berechnen, welche bei der Abnahme der Schwingungsbogen geleistet wird. Bei Versuchen mit wachsenden Abständen A des Magnets von einer Eisenscheibe nahm das Verhältniss L/L_1 ziemlich bedeutend ab, z. B. von 0,842 bis 0,567, wenn A von 11,5 bis 48,3 stieg; indess wird dies secundären Umständen zugeschrieben.

405 Dickere Eisenscheiben dämpfen weniger stark, als dünnere; entgegen dem Verhalten von Kupferplatten. Der Grund könnte nach meiner Meinung der sein, dass im ersten Falle die Scheiben überwiegend in der Richtung ihrer Dicke magnetisch polarisirt werden und so die entgegengesetzten Pole derselben von dem Pol der darüber hingehenden Magnetnadel nicht allzu ungleich weit entfernt sind, während die Polarität dünnerer Platten sich mehr in der Richtung ihrer Ebene herstellt, und unter dem Pol des schwingenden Magnets ein ungleichnamiger, und fern von demselben ein gleichnamiger Pol entsteht.

406 Hierauf dürfte auch folgende Erfahrung beruhen: Legt man unter eine Magnetnadel conaxial ein Eisenstück, so wird die Schwingungsdauer

des Magnets verkleinert, namentlich, wenn das Eisenstück schmal ist. Dann bildet dasselbe einen temporären Magnet, dessen Pole den darunter liegenden Polen der Nadel entgegengesetzt sind, und so die Nadel bei ihren Schwingungen in die Gleichgewichtslage zurückziehen. Je schmaler das Eisenstück, desto mehr ist diese Polarität auf einen linearen Streifen concentrirt.

Legt man dagegen unter einen einzelnen Pol der Nadel eine Eisenplatte, so wird die Schwingungsdauer vergrössert, wenn die Platte schmal ist; sie wird verkleinert, wenn sie breit ist[1]).

Meines Erachtens dürfte dieser Unterschied darauf beruhen, dass eine schmale Platte in der Richtung der magnetischen Axe des Magnets polarisirt wird, gerade unter dem Pol derselben, welchen wir als Nordpol annehmen, einen Südpol S, vor dem Nordpol am äusseren Ende einen Nordpol N erhält. Der Pol S ändert, abgesehen von der von Warburg beobachteten Erscheinung, die Schwingung der Nadel nicht, so lange sie nicht über die Eisenplatte hinaustritt, wohl aber wird durch den Nordpol N die Richtkraft der Erde vermindert; die Nadel schwingt langsamer. Ist die Platte breit, so erhält sie unter ihrem Nordpol einen Südpol, an ihren seitlich von der Magnetnadel liegenden Enden Nordpole. Nähert sie sich dem einen oder anderen bei ihren Ausschwingungen, so erhält sie, wenn sie ihrer Ruhelage zustrebt, einen Antrieb rückwärts und dadurch eine Beschleunigung ihrer Bewegung. Sie schwingt schneller.

407 Dieselbe scheinbare Verschiebung der magnetischen Polarität bemerkt man auch, wenn man eine eiserne Scheibe oder Kugel unter Einfluss des Erdmagnetismus rotiren lässt und ihre Polarität untersucht. Dieselbe verschiebt sich im Sinne der Bewegungsrichtung. Rotirt daher eine Scheibe nicht gerade in der, auf der Inclinationsrichtung senkrechten Ebene, so kann hierdurch ihre Einwirkung auf eine über ihr schwebende Magnetnadel wesentlich geändert werden.

Ueber diese Verschiebung der durch den Erdmagnetismus bewirkten Polarität rotirender Eisenscheiben und Eisenkugeln sind namentlich von Christie und Barlow Versuche angestellt worden.

Christie[2]) liess eine Eisenscheibe in verschiedenen Ebenen vor einer Declinationsnadel rotiren. Ihre ablenkende Wirkung auf die Magnetnadel war ein Maximum, als die Ebene der Scheibe der Inclinationsrichtung und zugleich der magnetischen Ostwestlinie parallel lag. Rotirte die Scheibe in einer horizontalen Ebene, so betrug die Wirkung auf die Nadel nur etwa $1/5$ der früheren. (Die jetzt auf die Scheibe wirkende horizontale Componente des Erdmagnetismus ist etwa nur $1/3$ der gesammten erdmagnetischen Kraft.) Endlich war die Wirkung auf die Nadel Null, wenn die Ebene der Scheibe zur Inclinationsrichtung nor-

---

1) Himstedt, l. c. — 2) Christie, Phil. Trans. 1825, p. 347*; Pogg. Ann. 4, p. 459*.

mal war. — Im Allgemeinen lassen sich die Resultate so aussprechen, dass, wenn die Wirkung auf eine, neben der Scheibe befindliche Neigungsnadel bezogen wird, dieselbe bei der Rotation der Scheibe so abgelenkt wird, dass ihre Projection auf die Scheibe sich in entgegengesetzter Richtung bewegt, wie die Scheibe selbst. — In der That bildet sich in dem Punkt der Scheibe, welcher dem unteren (d. i. im Vergleich zur Inclinationsnadel nordpolaren) Ende dieser Projection entspricht, durch den Einfluss des Erdmagnetismus gleichfalls ein Nordpol. Dieser wird in der Drehungsrichtung der Scheibe verschoben und stösst mithin den Nordpol der Inclinationsnadel nach der entgegengesetzten Seite ab.

Barlow[1]) liess eine achtzöllige Shrapnellkugel 720 Mal in der Minute um eine horizontale Axe auf einem Holzgestell rotiren und näherte ihr eine, auf einem besonderen Gestelle aufgestellte Bussole, deren Nadel durch einen genäherten, verticalen Magnetstab astasirt war. Die magnetische Axe der Nadel wurde auf den zu ihrem Mittelpunkt gehenden Radius der Kugel senkrecht gestellt.

Befand sich die Nadel in der durch die Rotationsaxe der Kugel gelegten Horizontalebene vor irgend einer Stelle derselben, so wurde ihr Nordpol von der Kugel angezogen, wenn sich die oberen Theile derselben gegen sie hin bewegten; im umgekehrten Falle wurde der Südpol der Nadel angezogen. Im ersten Falle wurden die oberen, durch die Wirkung des Erdmagnetismus südlich polarisirten, im zweiten die unteren, durch dieselbe nördlich polarisirten Theile der Kugel der Nadel genähert und behielten dabei ihren Magnetismus zum Theil bei. An den Enden der Rotationsaxe fand keine Wirkung auf die Nadel statt, in der darauf senkrechten Ebene war sie ein Maximum.

Ist die Bussolennadel nicht astasirt, so nimmt sie eine mittlere Stellung unter dem Einfluss des Erdmagnetismus und der gedrehten Kugel an.

Poisson[2]) hat diese Erscheinungen einer mathematischen Behandlung unterworfen, welche auf den Bd. II, §. 16, Bd. III, §. 379 u. flgde. mitgetheilten Principien basirt ist. Nur sind die Werthe α, β, γ daselbst als Functionen der Zeit anzunehmen. Wir müssen in Bezug auf diese Berechnungen auf das Original verweisen und glauben dies um so eher thun zu können, als die Resultate der Rechnung in Folge des im Eisen zurückbleibenden permanenten Magnetismus und der in seiner Masse bei der Bewegung entstehenden Inductionsströme, welche neue Magnetisirungen hervorrufen, nur unvollkommen mit den Beobachtungen übereinstimmen können.

408 Einige Erscheinungen, welche ihre Erklärung in denselben Ursachen finden, wie die bisher mitgetheilten Phänomene, sind folgende: Lässt

---

[1]) Barlow, Phil. Trans. 1825, p. 317*; Pogg. Ann. 4, p. 464*. — [2]) Poisson, Mémoire sur la théorie du magnétisme en mouvement (10 Juillet, 1826); Mémoires de l'académie roy. de l'Institut 4, p. 441, Année 1823 (1827)*.

man einen hufeisenförmigen Magnet oder Elektromagnet vermittelst einer Centrifugalmaschine um eine verticale Axe rotiren, welche seinen Schenkeln parallel ist und sich in der Mitte zwischen denselben befindet, und streut auf eine über seinen Polen befindliche Glasplatte Eisenfeile, so folgen sie bei langsamer Drehung den Polen; bei schnellerer setzen sie sich in dem durch die Polflächen um die Rotationsaxe gelegten Kreise in eine, der Drehungsrichtung der Pole entgegengesetzten Richtung in Bewegung. — Eine Halbkugel von Eisen, welche auf die Glasplatte aufgelegt wird, verhält sich wie die Eisenfeile [1]).

---

[1]) Plücker, Pogg. Ann. 94, p. 40, 1855*.

Viertes Capitel.

Inductionsapparate.

---

409 Die Erscheinungen der Induction werden vielfach verwendet, um eine Reihe schnell auf einander folgender, sei es abwechselnd entgegengesetzt, sei es gleich gerichteter Ströme zu erzeugen und somit eine dauernde Quelle von Elektricität herzustellen. Hierzu kann man entweder die Intensität des Stromes in einer inducirenden Spirale mit oder ohne Eisenkern verändern und so in einer dieselbe umgebenden Inductionsspirale Ströme induciren, wie bei den Inductorien, oder die relative Lage von Inductionsspiralen und Magneten oder Elektromagneten ändern, wie bei den Magnetelektrisirmaschinen und dynamoelektrischen Maschinen.

I. Inductorien.

410 Schon Pohl[1]) hat einen mit Drahtspiralen umgebenen Anker fest vor den Polen eines Elektromagnetes hingelegt, durch einen Commutator die Richtung des den letzteren magnetisirenden Stromes wiederholt umgekehrt und so in den Spiralen eine Reihe von Inductionsströmen erzeugt.

411 Zuweilen ist es wünschenswerth, namentlich für physiologische Versuche, eine ganz regelmässig sich ändernde elektromotorische Kraft zu erhalten. Hierzu dient das Sinusrheonom[2]).

Eine mit Windungen von dickem Draht umwickelte Holzkugel von 4,5 cm Durchmesser dreht sich in einer anderen, mit vielen Windungen von feinem Draht (2 km) bedeckten, aus zwei Hälften bestehenden Hohlkugel von 6 cm Durchmesser. Durch geeignete Verbindungen wird ein

---

[1]) Pohl, Pogg. Ann. 34, p. 185, 500, 1835*. — [2]) Fleischl, Arch. f. Physiol. 1882, p. 25*; Beibl. 6, p. 511*.

Strom durch das Gewinde der inneren Kugel geleitet. In den Windungen der äusseren Kugel, welche denen der inneren parallel sind, wird bei der Rotation der inneren um eine den Windungsebenen parallele Axe ein Strom inducirt.

Die inducirte elektromotorische Kraft ändert sich hier wie der Sinus eines gleichförmig wachsenden Bogens.

412 Bereits §. 5 haben wir in dem Schlittenapparate von E. du Bois-Reymond ein für viele Zwecke sehr brauchbares Inductorium kennen gelernt, bei welchem man durch Verschieben der Inductionsspirale gegen die inducirende das Potential beider auf einander und somit die elektromotorische Kraft der Induction verändern kann.

Zur Erzeugung grösserer Elektricitätsmengen bei der Induction, namentlich zur Durchbrechung der Luft in Funken, sind namentlich von Stöhrer und Ruhmkorff grosse Inductorien, zunächst in den in den Fig. 101 und 102 abgebildeten, einfacheren Formen ausgeführt worden.

Fig. 101.

Diese Apparate bestehen im Wesentlichen aus einer verticalen oder horizontalen inducirenden Spirale A von dickerem Draht, über die entweder direct eine zweite Spirale B von sehr langem dünnem Draht gewunden ist, oder eine besondere Papp- oder Glasröhre geschoben

wird, auf welche die letztere Spirale aufgewickelt ist. Dieselbe bildet entweder ein einziges Continuum von Drahtwindungen oder besteht zweckmässiger aus mehreren neben einander liegenden Abtheilungen, die durch

Fig. 102.

Klemmen o, p hinter einander verbunden werden. In die inducirende Spirale ist ein Bündel von lackirten oder geglühten Eisendrähten eingelegt. Der Strom in der inducirenden Spirale wird durch irgend eine Vorrichtung H unterbrochen oder umgekehrt. Man bedient sich hierzu meist des Wagner'schen Hammers, welcher theils, wie in den älteren Ruhmkorff'schen Apparaten, Fig. 102, direct mit dem Bündel Eisendraht verbunden ist, theils, wie in Stöhrer's Apparat, Fig. 101, gesondert neben dem Apparate angebracht ist.

Mit den beiden gegen einander hämmernden, den Strom unterbrechenden Theilen des Hammerapparates sind noch die Belegungen eines Condensators verbunden, welcher in einem unter dem Apparat befindlichen Kasten liegt. Der Apparat liefert dann während der Unterbrechungen abwechselnd gerichtete Oeffnungs- und Schliessungsströme in der Inductionsrolle, deren Enden mit den auf Glasfüssen stehenden Kugeln oder Spitzen s, t verbunden sind.

413 Die näheren Einrichtungen der einzelnen Theile der eben kurz beschriebenen Apparate müssen so getroffen sein, dass derselbe kurz dauernde Inductionsströme von recht grosser Intensität liefert, dass also in einem möglichst kurzen Zeitraum in demselben eine möglichst grosse elektromotorische Kraft erregt wird. — Die wesentlichen Einrichtungen hierzu sind namentlich folgende [1]:

1) Die Inductionsrolle. Soll die Intensität des Oeffnungsinductionsstromes, welchen man besonders berücksichtigt, von Anfang sei-

---

[1]) Vergl. vorzüglich Poggendorff, Pogg. Ann. 94, p. 289, 1855*.

ner Bildung an schnell ein Maximum erreichen, so haben wir die §. 137 u. flgde. aufgestellten Betrachtungen zu berücksichtigen, wenn wir zunächst nur die Induction der Spiralen auf einander betrachten. Die Induction durch den Eisenkern im Inneren der Spiralen nimmt einen ähnlichen Gang. Es muss also das Potential P_1 der inducirenden Spirale auf die inducirte möglichst gross, das Potential P_2 der inducirten Spirale auf sich selbst möglichst klein, der Widerstand w der inducirenden Spirale möglichst klein sein. Da ferner in der Inductionsrolle Elektricität entwickelt wird, welche an den einzelnen Stellen eine bedeutende Dichtigkeit besitzt, die von der Mitte des Drahtes der Rolle gegen die Enden hin zunimmt, so müssen die Enden desselben auf entgegengesetzten Seiten der Rolle liegen, damit die mit den ungleichnamigen Elektricitäten am stärksten geladenen Theile des Drahtes sich möglichst fern von einander befinden [1]).

Wickelt man die ganze Inductionsrolle in einzelnen Drahtlagen, deren jede ihre ganze Länge einnimmt, so liegen auch hier in den über einander befindlichen Lagen Stellen neben einander, in denen die elektrische Dichtigkeit sehr verschieden ist, und so können leicht Funkenentladungen dazwischen stattfinden, welche die die Drähte bedeckende isolirende Schicht durchbrechen. — Sehr vollständig wird dies bei der jetzt vielfach angewendeten Methode von Ritchie [2]) verhindert, nach welcher der Draht an einer Stelle bis zur völligen Dicke der Spirale und dann erst an der benachbarten Stelle in gleicher Weise aufgewickelt wird. Zwischen die einzelnen Stellen wird häufig ein Ring von dünnem vulkanisirtem Kautschuk geschoben und angekittet.

Wegen der Schwierigkeit der Ausführung dieser Bewickelung theilt man zuweilen die Inductionsrolle wenigstens in mehrere neben einander liegende Abtheilungen, deren jede eine ungerade Anzahl von Drahtlagen besitzt, so dass Anfang und Ende an entgegengesetzten Seiten der Abtheilungen liegen. Man verbindet die Drähte derselben hinter einander.

Da die inducirende Wirkung (das Potential) des Stromes der inducirenden Rolle auf die inducirte Rolle in der Mitte am grössten ist, würde man zweckmässig die mittleren Abtheilungen der letzteren dicker winden, als die Abtheilungen an den Enden, so dass die inducirte Rolle die Form einer Spindel erhielte.

So hat Schaack [3]) ein Eisendrahtbündel aus zusammengekitteten Drähten in Gestalt einer Kugel geformt, auf welche drei Lagen dicken Kupferdrahtes gewickelt waren, die durch Messingstäbe, welche den Eisendrähten conaxial waren, mit der Säule in Verbindung standen. Um die mit Kitt überzogenen Drähte war kugelförmig die Inductionsspirale in

---

[1]) Vergl. auch R. Robinson, Phil. Mag. [4] **33**, p. 63, 1867*. — [2]) Ritchie, Phil. Mag. [4] **14**, p. 239, 480, 1857*. — [3]) Schaack, Brix, Zeitschrift 1863, p. 45*.

vielen, durch Papierringe getrennten Abtheilungen gewickelt. Die Wirkung des mit Condensator versehenen Apparates war recht befriedigend.

Die Drahtwindungen der inducirten Rolle müssen sehr gut isolirt sein, damit bei der plötzlichen Erregung sehr bedeutender Elektricitäten in ihr nicht Funken zwischen den einzelnen Windungen überschlagen. Man windet daher am besten den etwa $^1/_4$ mm dicken, gut mit Seide übersponnenen Draht auf einen beiderseits mit Glas- oder Guttaperchafassungen versehenen Glascylinder und tränkt die Umspinnung nach dem Aufwinden jeder Lage mit langsam trocknendem Schellackfirniss, mit geschmolzenem Wallrath oder Paraffin, oder einem Gemisch von Wachs und Oel. Zwischen je zwei Lagen legt man wohl noch ein Wachspapier oder eine dünne Guttaperchaplatte [1]). Am besten würde es sein, die Inductionsrolle mit einem flüssigen Isolator, z. B. Terpentinöl, zu tränken, damit, wenn ein Funken an irgend einer Stelle zwischen den Windungen überschlagen sollte, die Durchbrechungsstelle sogleich wieder ausgefüllt wird. Diesen Vorschlag Poggendorff's (l. c.) hat Jean [2]) mit gutem Erfolge ausgeführt; indess ist doch die Anwendung einer Flüssigkeit, welche sich überdies bei Zutritt der Luft verändert und dann das Kupfer der Drähte angreift, nicht bequem.

Sinsteden [3]) löthet noch an das äussere Ende des inducirten Drahtes ein 7 Fuss langes, 7 Zoll breites Stanniolblatt, welches beiderseits mit etwas breiterem Wachspapier belegt und so auf die Inductionsrolle gewunden wird. Indem sich in diesem Blatte eine grosse Menge der in der Spirale inducirten Elektricitäten anhäuft, zeigt sie stärkere Entladungen. — Man muss endlich vermeiden, dass der Widerstand, welchen die zwischen den freien Enden der Inductionsrolle überspringenden Funken finden, grösser ist, als der Widerstand beim Uebergange durch die isolirende Schicht von einer Drahtwindung zur anderen, da die letztere sonst leicht durchbrochen wird. Namentlich bei Erzeugung von Funken im lufterfüllten Raume darf man daher den Abstand der Elektroden der Inductionsrolle nie zu gross wählen.

414 2) Die inducirende Spirale oder Hauptrolle. Da der Raum meist gegeben ist, in welchen der Draht dieser Spirale hineinpassen soll, so kann man ihn beliebig dick wählen, und muss nur die Säule, welche den durch die Spirale geleiteten Strom erzeugt, so abändern, dass man bei gegebener Zinkoberfläche das Maximum der Intensität erhält. Gewöhnlich nimmt man den Draht etwa 1 bis 2 mm dick und wickelt ihn zweckmässig in zwei neben einander liegenden Windungsreihen auf.

Das in die Rolle gelegte Eisendrahtbündel wird aus dünnen Drähten gebildet. Dieselben brauchen nicht lackirt zu sein, sondern werden nur ausgeglüht, wodurch sie einmal weicher werden, sodann auch an

---

[1]) Bentley, Phil. Mag. [4] 12, p. 519, 1857*. — [2]) Jean, Compt. rend. 46, p. 186, 1858*. — [3]) Sinsteden, Pogg. Ann. 96, p. 359, 1855*.

ihrer Oberfläche eine genügend schlecht leitende Hülle erhalten. Sie werden nicht zu fest an einander geschnürt.

415 3) Die Unterbrechung des inducirenden Stromes wird meist mit Hülfe des Wagner'schen Hammers vorgenommen. Man kann hierbei zunächst das Eisendrahtbündel in der Hauptrolle selbst als Magnet benutzen, welcher den Hammer antreibt. — Auf diese Weise ist der zuerst von Ruhmkorff angegebene Interruptor, Fig. 103, construirt.

Fig. 103.

M ist das aus der inducirenden Spirale herausragende Ende des Eisendrahtbündels, welches daselbst mit einem Eisenringe eingefasst ist. Ein Hebel *ED* von Metall bewegt sich in einem Lager auf dem metallenen Ständer *IK*, welcher durch die Klemmschraube *H* mit dem einen Ende der inducirenden Rolle verbunden ist. Ein zwischen die Klemmschrauben *E* und *G* eingefügter, dünner Silberdraht vermittelt die bessere Leitung zwischen *DE* und *KI*. An dem unter *M* befindlichen Ende des Hebels ist eine Eisenplatte *D* befestigt, welche unten die Platinplatte *J* trägt. Diese liegt auf einer zweiten, durch die Feder *AB* getragenen Platinplatte *B* auf. Feder *AB* kann durch die Schraube *C* gehoben und gesenkt werden; sie wird mit dem einen Pol der Säule, das freie Ende der inducirenden Spirale mit dem anderen Pol der letzteren verbunden. Dann hebt sich durch die Magnetisirung von *M* das Eisenstück *D* an Hebel *DE* gegen *M* und unterbricht den inducirenden Stromkreis zwischen *B* und *J*. Hebel *DE* fällt wieder hinunter und schliesst den Stromkreis von Neuem u. s. f. — Der Fig. 102 gezeichnete Interruptor ist ganz ähnlich construirt, nur dass sich die Platte *D* vor dem Drahtbündel *M* befindet.

Viel zweckmässiger legt man bei dieser Art der Unterbrechung, wie im Wesentlichen von Sinsteden[1]) angegeben ist, neben die Inductionsrolle *I*, Fig. 104, ein dem Eisendrahtbündel *M* gleiches und ihm paralle-

[1]) Sinsteden, Pogg. Ann. **96**, p. 366, 1855*, siehe auch Trowbridge, Phil. Mag. [5] **1**, p. 564, 1876*. Arzberger, Zeitschr. f. Instrumentenkunde, **2**, p. 6, 1882*; Beibl. **6**, p. 253*, auch Ducretet, Compt. rend. **92**, p. 1228* und M. Deprez, ibid. p. 1283, 1881*; Beibl. **5**, p. 615*.

les Drahtbündel und verbindet die einen Enden M_1 und N_1 der beiden Bündel durch ein Querstück K von Eisen. Die Enden M und N werden mit Eisenplatten belegt. Um ein am Ende N des Drahtbündels NN_1 angebrachtes Charnier dreht sich ein eiserner, als Anker dienender Stab L, der durch die Feder F oder eine zwischen ihn und das Ende N des Bündels NN_1 geklemmte Kautschukplatte von dem Ende M des Bündels MM_1 fortgedrückt wird.

Fig. 104.

Auf den Anker L ist die Platinspitze o gelöthet, welche mit dem einen Ende der inducirenden Spirale verbunden ist und durch die Feder F gegen eine zweite Platinspitze p gedrückt wird, die durch die Klemmschraube q, ebenso wie das freie Ende der inducirenden Spirale mit den Polen der Säule in Verbindung steht. Der Anker wird bei seinen Oscillationen durch die Feder F oder die dieselbe ersetzende Kautschukplatte sehr schnell von dem Ende M des Eisendrahtbündels MM_1 getrennt und so der temporäre Magnetismus des geschlossenen Eisenkreises MM_1KNN_1L plötzlich vernichtet. Da dieser Magnetismus sehr viel bedeutender ist als der des Bündels MM_1 allein, so ist die Wirkung in Bezug auf den Oeffnungsinductionsstrom bedeutend verstärkt [1]).

416 Bei grösseren Apparaten trennt man gewöhnlich den Interruptor von dem Inductionsapparat selbst. Man schaltet in den Schliessungskreis des inducirenden Stromes einen Wagner'schen Hammer ein, welchem man die Fig. 5, pag. 8 gezeichnete, von Halske angegebene Construction giebt. Dieser Apparat erfüllt die Bedingung, dass der inducirende Stromkreis sehr plötzlich zu einer Zeit unterbrochen wird, wo schon die oscillirende Feder des Interruptors eine bedeutende Geschwindigkeit erlangt hat. Die in der kurzen Zeit dieser Unterbrechung inducirte elektromotorische Kraft des Oeffnungsinductionsstromes ist also sehr bedeutend; die Anhäufung freier Elektricitäten an den Enden der Inductionsspirale und die physiologischen Wirkungen derselben sind höchst kräftig.

Ist indess die Oscillationsgeschwindigkeit der Zunge des Hammers allzu schnell, so erhält man keine sehr intensiven Inductionsströme,

---

[1]) Statt die Drahtbündel hierbei hinten durch das Eisenstück K zu verbinden, legt Sinsteden auch gegen ihre Enden M_1 und N_1 die Pole eines starken hufeisenförmigen Stahlmagnets in der Art, dass bei der Magnetisirung der Drahtbündel durch den Strom ungleichnamige Pole des Stahlmagnets und der letzteren einander gegenüber stehen. — Eine Umkehrung der Stromesrichtung in der Magnetisirungsspirale ohne Oeffnung des geschlossenen Eisenkreises würde noch stärker wirken.

da dann der bei der Schliessung des inducirenden Stromkreises gebildete Extrastrom noch nicht völlig ablaufen kann, der Eisenkern nicht das Maximum seiner Magnetisirung erhält und auch der inducirende Strom nicht bis zum Maximum der Intensität anwächst. Ist dies letztere erfolgt, so sind die oscillirenden Theile der Unterbrechungsapparate möglichst schnell von einander zu trennen, um den Oeffnungsstrom recht kurz andauernd und intensiv zu erhalten [1]).

417 Bestehen die gegen einander schlagenden Theile des Interruptors, statt aus Platin, aus anderen Stoffen, z. B. aus Silber, Coaks u. s. f., so beobachtet man, nach Sinsteden [2]), an der Inductionsspirale sehr viel geringere Spannungserscheinungen, wahrscheinlich weil dann nach der Trennung Theilchen geschmolzenen Silbers oder zerstäubter Coakskohle noch einige Zeit die Leitung vermitteln und der inducirende Strom nicht plötzlich genug unterbrochen wird. — So fand auch Rijke (l. c.) im Mittel die Schlagweite der Funken an den Enden des inducirten Drahtes, als die Unterbrechung des inducirenden Stromes geschah zwischen Spitzen von:

Platin	Silber	Palladium	Gold	Kupfer	Coaks
13	9,2	8,1	2,3	4,7	0,5 mm

Wird der Anker des Interruptors mit stärkerer Kraft, z. B. durch Gewichte oder starke Federn von dem Magnet fortgedrückt, so geschieht bei Erregung desselben die Unterbrechung schneller, und der Einfluss des Metalls der Spitzen ist weniger bemerkbar.

418 In einer sehr zweckmässigen Weise wird die Schnelligkeit der Unterbrechung des inducirenden Stromes ohne einen allzu schnellen Gang des Hammerapparates gesteigert, wenn man nach Poggendorff's (l. c. §. 413) Vorschlag schlecht leitende Flüssigkeiten zwischen die in Contact kommenden Theile des Interruptors bringt. — Der dazu erforderliche Hammerapparat ist von Ruhmkorff nach dem Vorgange von Foucault [3]) im Wesentlichen meist in folgender Art construirt worden.

Vermittelst einer Zahnstange mit Trieb, Fig. 105, lässt sich in einer Metallhülse *a* eine verticale Stahlfeder *f* auf- und niederstellen, welche oberhalb den Hebel *g* trägt. Durch eine auf dem Stab *c* verstellbare Metallkugel *k* kann die Oscillationsgeschwindigkeit des Hebels geregelt werden. Derselbe trägt einerseits den Eisenstab *s*, welcher als Anker zu dem Elektromagnet *m* dient; andererseits zwei Platinstifte *h* und *i*, welche in die Gläser *R* und *P* tauchen. In die Mitte des Bodens der letzteren sind Platinstäbchen eingekittet, die mit verticalen Messingschrauben mit

---

[1]) Grove, Phil. Mag. [4] **9**, p. 2, 1855*. Rijke, Pogg. Ann. **97**, p. 67, 1856*. — [2]) Sinsteden, Pogg. Ann. **85**, p. 481, 1852*. — [3]) Foucault, Compt. rend. **43**, p. 44, 1856*. Ein ähnlicher, als Gyrotrop dienender Apparat mit vier Gläsern siehe Villari, Nuovo Cimento [2] **11**, p. 266, 1874*.

Köpfen von Hartgummi in Verbindung stehen, durch welche die Gläser in Messingfassungen auf- und niedergeschraubt werden können. In die Gläser wird Quecksilber gegossen und dasselbe mit einer etwa 10 bis

Fig. 105.

20 mm dicken Schicht von Alkohol oder Petroleum bedeckt. Die das Glas R tragende Messingfassung ist durch das Kupferblech b mit dem einen Ende der durchbrochenen Axe des Ruhmkorff'schen Gyrotrops M verbunden. (Die Walze desselben, welche ganz der Walze des Gyrotrops N entspricht, ist in der Figur fortgelassen.) Das andere Ende jener Axe ist mit den Drahtwindungen des Magnets m verbunden, die andererseits mit der Metallhülse a in Verbindung stehen. Die gegen den Gyrotrop schleifenden Federn werden mit den Polen eines Bunsen'schen oder Grove'schen Elementes verbunden. Taucht der Draht h gerade in das Quecksilber des Glases R ein, so ist der Strom geschlossen

und der Hebel g oscillirt nach Art des W a g n e r'schen Hammers. — Die Metallhülse unter dem Glase P ist mit dem einen Ende der durchbrochenen Axe des Gyrotrops N, das andere Ende der Axe desselben durch den Kupferstreifen d mit der Klemmschraube C verbunden. Letztere, sowie eine mit der Hülse a verbundene Klemmschraube D sind mit den Enden der inducirenden Spirale verbunden. Die gegen den Gyrotrop schleifenden Federn sind mit den Polen einer stärkeren Säule in Verbindung, so dass bei richtiger Stellung des Gyrotrops der Strom derselben durch d und C und die inducirende Spirale nach D, und sodann gleichzeitig mit dem Strom der ersten, mit Gyrotrop M verbundenen Kette durch a und g, und endlich durch P zum Gyrotrop zurückfliesst. Bei dem Oscilliren des Hebels g, der den Platindraht i in weiten Wegen auf und nieder bewegt, wird der Kreis des inducirenden Stromes durch das Quecksilber im Glase P abwechselnd geöffnet und geschlossen. Fig. 106 stellt die zu

Fig. 106.

dem beschriebenen Interruptor gehörige Inductionsrolle eines grossen R u h m k o r f f'schen Inductoriums dar, dessen Länge 65 cm beträgt, und

dessen inducirte Spirale etwa 100000 Windungen von $1/5$ mm dickem, übersponnem Kupferdraht enthält. Die Klemmen *A* und *B*, in welche die Drahtenden der inducirenden Rolle eingeklemmt sind, sind zugleich mit den Klemmschrauben *C* und *D* verbunden, die mit den gleichnamigen Klemmschrauben des Interruptors in Verbindung stehen. Der Condensator (siehe weiter unten), dessen Belegungen ebenfalls mit den Klemmen *A* und *B* verbunden sind, liegt in dem Kasten *K*. Die Enden *F* und *G* der Inductionsrolle sind mit zweien auf die Glasstäbe *H* und *J* aufgesetzten Messingklemmen verbunden, von wo der Strom weiter geführt werden kann.

Selbstverständlich kann man, wie es bei älteren Apparaten von Ruhmkorff und den kleineren Apparaten von Stöhrer der Fall ist, auch den ganzen vorderen Theil des Apparates, Platinstab *i*, Glas *P*, Gyrotrop *N* mit der damit verbundenen Säule fortlassen, und die inducirende Spirale direct in den Schliessungskreis des den Magnet *m* erregenden, durch Gyrotrop *M* geleiteten Stromes einfügen. Dann bewirkt der inducirende Strom selbst die Unterbrechungen. Indess ist dabei der Gang des Apparates in Folge der Rückwirkung der Extraströme weniger regelmässig und schwieriger zu reguliren [1]).

419 Bei länger fortgesetztem Gebrauch des Apparates zerstäubt das Quecksilber in kleine, schwer wieder zu vereinigende Tropfen, welche sich in dem darüber befindlichen Alkohol vertheilen. Um diesen Uebelstand zu vermeiden, kann man das Quecksilber durch ein specifisch schwereres, flüssiges Platinamalgam ersetzen. — Auch kann man einen Wasserstrom über die Quecksilberoberfläche leiten, um das zerstäubte Metall fortzuschwemmen.

Zweckmässig kann man die Oxydation des Quecksilbers verhindern, indem man den ganzen Unterbrechungsapparat unter eine mit Wasserstoff gefüllte Glasglocke bringt. Die Oberfläche bleibt dann blank und rein [2]).

---

[1]) Die Inductorien sind wiederholt in colossalen Dimensionen ausgeführt worden. So ist für die Polytechnic Institution in London ein solcher Apparat von 9 Fuss 10 Zoll Länge und 2 Fuss Durchmesser gebaut worden, dessen Eisenkern aus einem 5 Fuss langen Bündel von Eisendrähten von 4 Zoll Durchmesser und 123 Pfund Gewicht besteht. Die primäre Rolle ist 145 Pfund schwer und hat 6000 Windungen. Ihr Kupferdraht ist 0,095 Zoll dick und 3770 Yards lang. Die Inductionsrolle ist 50 Zoll lang und besteht aus 150 engl. Meilen Kupferdraht von 0,015 Zoll Durchmesser. Beide Rollen sind durch eine $1^1/_2$ Zoll dicke Schicht Kammmasse getrennt; ebenso ist der ganze Apparat von einer solchen Röhre bedeckt. Durch den Strom von 40 Bunsen'schen Elementen erregt, liefert der Apparat Funken von 29 Zoll Länge und scheinbar $3/4$ Zoll Dicke. Er durchschlägt Gläser von 5 Zoll Dicke in Zickzackwegen. Bei einem Abstande der Elektroden von 3 Zoll fliessen die Entladungen wie in wogenden, leicht seitlich wegzublasenden Flammen über. (Illustrated London News, 17. Apr. 1869*; Pogg. Ann. **136**, p. 636, 1869*. Ein anderer grosser Apparat von Ritchie, Scientific American, 1871, p. 320*; Dingl. J. **203**, p. 502*. Ein anderer ähnlicher Apparat von Spottiswoode, Phil. Mag. [5] **3**, p. 30, 1877*; Beibl. **1**, p. 250*. — [2]) Budde, Wied. Ann. **20**, p. 167, 1883*.

Eine einfache Vorrichtung ist zu diesem Zwecke von Kirn[1]) angegeben worden. Durch den am Anker des Magnets angebrachten Hebel-

Fig. 107.

apparat, Fig. 107, wird ein um seine Längsaxe drehbares, in der Mitte mit einer Erweiterung versehenes Glasrohr, Fig. 108, hin und her gedreht.

Fig. 108.

Das Glasrohr ist mit Wasserstoff gefüllt, in die Kugel Quecksilber hineingebracht, welches durch einen an das eine Ende des Rohres eingeschmolzenen Platindraht mit der Leitung communicirt. Ein in das andere Ende eingeschmolzener, andererseits mit derselben communicirender Draht endet über dem Quecksilber in einer Spitze, welche bei den Hin- und Herdrehungen des Rohres das Quecksilber berührt.

420 Die Verstärkung der in der Zeiteinheit erhaltenen Intensität der Inductionsströme oder der an den Enden der inducirten Spirale in der

[1]) Kirn, Wied. Ann. 22, p. 135, 1884*. Ein ähnlicher Apparat ist für elektrische Uhren bereits von Menges (Tijdschrift van het. k. Inst. v. Ingenieurs, 1876 u. 1877, p. 119*) beschrieben worden.

Zeiteinheit angehäuften Elektricitätsmengen, d. i. ihrer freien Spannung daselbst, durch die Zwischenbringung schlecht leitender Flüssigkeiten zwischen die metallischen Enden der Unterbrechungsstelle des inducirenden Stromes beruht auf der Beschleunigung seiner Unterbrechung und dadurch erfolgenden Verringerung der Dauer des Oeffnungsinductionsstromes in der Inductionsspirale. Bei der Trennung der einander berührenden Metalltheile entsteht zwischen ihnen ein Oeffnungsfunken, welcher durch die zugleich sich bildenden Extraströme verstärkt wird und einen kleinen Lichtbogen einleitet, der die Verbindung der getrennten Theile noch einige Zeit bis zu einer weiteren Entfernung derselben von einander vermittelt, so dass der inducirende Strom nur langsam verschwindet. Tritt aber eine schlecht leitende Flüssigkeit, z. B. Alkohol, zwischen die getrennten Theile, so kann der Lichtbogen nicht zu Stande kommen. Durch die Flüssigkeit gleichen sich die Elektricitäten, welche in Folge des inducirenden Stromes und des bei seiner Oeffnung in der inducirenden Rolle erzeugten Extrastromes an der Unterbrechungsstelle angehäuft sind, schnell aus, und der Strom in derselben Rolle wird auf ein Minimum reducirt, welches von dem Leitungswiderstande der Flüssigkeit abhängt.

Leitet die Flüssigkeit sehr gut, wie z. B. verdünnte Schwefelsäure, so ist die Intensität des Stromes nach der Trennung der metallischen Theile an der Unterbrechungsstelle zu gross, die Verminderung der Intensität des inducirenden Stromes zu klein, als dass er eine starke inducirende Wirkung ausübte. — Ist dagegen die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit zu klein, so können sich die bei der Trennung gebildeten Extraströme nicht durch dieselbe ausgleichen; die durch sie gegen die Unterbrechungsstelle getriebenen Elektricitäten gleichen sich dann rückwärts durch die inducirende Spirale selbst aus und induciren hierbei in der Inductionsspirale einen Strom, welcher dem bei der Oeffnung der ersteren Spirale inducirten entgegengerichtet ist und ihn schwächt [1]).

421 Ganz ebenso, wie eine schlecht leitende Flüssigkeit, wirkt nach Fizeau's [2]) Angabe die Verbindung der von einander getrennten Theile an der Unterbrechungsstelle durch einen langen, dünnen Draht. — Ebenso wirkt auch die Verdünnung der Luft zwischen denselben, wenn man den ganzen Unterbrechungsapparat, wozu man dann den Halske'schen Hammer verwenden kann, im Vacuo arbeiten lässt [3]). Hier ersetzt die verdünnte Luft die schlecht leitende Flüssigkeit. Dabei werden aber die gegen einander federnden Platintheile des Interruptors stark angegriffen. Namentlich wirkt dieses Hülfsmittel, wenn die inducirende Rolle aus kurzem und dickem Drahte besteht.

---

[1]) Poggendorff, Pogg. Ann. **94**, p. 320, 1855*. — [2]) Fizeau, Compt. rend. **36**, p. 419, 1853*; Pogg. Ann. **89**, p. 173*. — [3]) Poggendorff, Pogg. Ann. **95**, p. 156, 1855*.

In ähnlicher Art verstärkt auch ein der Unterbrechungsstelle genäherter Magnet die Inductionswirkung in der Zeiteinheit, da er nach den Untersuchungen von Rijke[1]) den sich bildenden Lichtbogen zur Seite treibt und schneller unterbricht. Der Funken ist dann von einem stärkeren Geräusch begleitet[2]).

Rijke[3]) hat versucht, die Dichtigkeit der Elektricitäten an der Unterbrechungsstelle des Ruhmkorff'schen Inductoriums dadurch zu vermindern und die Dichtigkeit und Schlagweite des Inductionsstromes zu vergrössern, dass er die Unterbrechung in einer Flamme vornahm. Die Enden der inducirenden Rolle waren entweder (I) mit zwei Ringen von Platindraht verbunden, welche man in der Flamme an einander hingleiten liess, oder (II) mit einer kleineren Metallplatte und einer Metallspitze, deren letztere als positive Elektrode diente und von ersterer abgehoben wurde. Die Funken der Inductionsrolle sprangen zwischen den Kugeln eines Funkenmikrometers über. So fanden sich die relativen Längen der Schlagweiten dieser Funken, wenn die Unterbrechung des inducirenden Stromes geschah in 422

	Luft	Flamme von Alkohol	Wasserstoff	Leuchtgas
I	1	2,395	7,110	7,173
II	1	1,643	4,077	3,966

Bei Anwendung eines Fizeau'schen Condensators (s. w. u.) wird die Wirkung der Flamme viel geringer. Sie zeigt sich also um so schwächer, eine je grössere Schlagweite schon ohne sie erhalten wird.

Wurden die unter (II) angeführten Elektroden in verschiedenen Theilen der Flamme von einander getrennt, so waren die Schlagweiten

Luft	heissester Theil der Flamme	heller Theil	unterer Theil
21,9	23,5	54,45	70,85 mm

Der untere, kälteste Theil der Flamme übt also den grössten Einfluss aus.

Geschieht die Unterbrechung in nicht entzündetem Leuchtgas oder Wasserstoff, so nimmt die Schlagweite ebenfalls zu, indess etwas weniger, als bei Unterbrechung in dem kälteren Theil der Flamme. Wird der Strom in Luft, Kohlensäure und Ammoniakgas unterbrochen, so verhalten sich die Schlagweiten wie 1 : 1,01 : 1,58; in Luft, Sauerstoff, Stickstoff und Chlor wie 1 : 1,096 : 1,057 : 0,872. Wird die Unterbrechung in bewegter, durch einen Blasebalg fortgetriebener Luft vorgenommen, so wird die Schlagweite grösser; ebenso ist sie bei Unterbrechung unter ruhendem und bewegtem Wasser in letzterem Falle bedeutender. — Der Grund dieser Aenderungen ist der gleiche, welchen wir schon oben

---

1) Rijke, Pogg. Ann. **89**, p. 166, 1853*. — 2) Page, Phil. Mag. [4] **1**, p. 170, 1850*. — 3) Rijke, Pogg. Ann. **117**, p. 276, 1862*.

angeführt haben. Die Dauer der Entladung zwischen den getrennten Elektroden des inducirenden Drahtes wird vermindert, die Dichtigkeit des Inductionsstromes vermehrt. — Die Verkürzung der Zeit bis zur völligen Unterbrechung des Schliessungskreises durch Einschaltung einer Flamme an der Unterbrechungsstelle kann man auch nachweisen, wenn man die Enden der Leitungsdrähte eines Schliessungskreises, welcher eine Drahtspirale und eine Säule enthält, mittelst Handhaben mit den Händen verbindet. Trennt man die einander berührenden Enden der Leitungsdrähte in einer Flamme, so verläuft der gebildete Extrastrom in kürzerer Zeit, die Erschütterung durch denselben ist stärker, als bei Trennung in der Luft. Untersucht man aber hierbei die Wirkung der Extraströme für sich am Elektrodynamometer nach der §. 163 angegebenen Methode, so zeigt sich dieselbe gegen die Erwartung bei den verschiedenartigen Unterbrechungen gleich. Ganz entsprechend fand sich bei Untersuchung der inducirten Ströme mittelst des Elektrodynamometers und des Riess'schen Luftthermometers, welches in den Schliessungskreis der Inductionsspirale eingefügt war (die man in letzterem Falle aus dickerem Draht winden muss), eine fast gleiche elektrodynamische und thermische Wirkung bei Unterbrechung der inducirenden Ströme in der Luft und in der Flamme. Dieselben Erscheinungen zeigten sich, als die Unterbrechung des inducirenden Stromes in der Nähe eines Magnetes geschah und dadurch beschleunigt wurde. Bei Unterbrechung des inducirenden Stromes in der Flamme erwiesen sich dagegen die physiologischen Wirkungen des Inductionsstromes geringer, als bei Unterbrechung in der Luft. Der Grund dieser Erscheinungen liegt wohl in der verschiedenartigen Schliessung des inducirten Stromes bei Beobachtung seiner verschiedenen Wirkungen, wodurch die Rückwirkung auf den inducirenden Kreis gleichfalls geändert wird.

423 In einer ganz anderen Art erreicht man dieselben Zwecke durch Verbindung der Belegungen eines Condensators mit den beiden metallischen Theilen der Unterbrechungsstelle. Derselbe ist zuerst von Fizeau (l. c., §. 421) angegeben worden. Er besteht je nach der Construction der übrigen Theile des Apparates aus einem dünnen Glimmerblatt oder einem Stück Wachspapier von etwa 10 cm Länge und 6 bis 8 cm Breite, welches beiderseits nach Art einer Franklin'schen Tafel mit Stanniol belegt ist, oder aus einem eben so mit Stanniol belegten langen, z. B. 10 cm breiten, 1 m langen Streifen von stark gefirnisstem Papier oder Wachspapier. — Ruhmkorff schichtet etwa 20 bis 30 Stanniolblätter von etwa 20 cm Breite und 30 bis 40 cm Länge abwechselnd mit etwas grösseren Blättern von Wachspapier über einander, so dass die abwechselnden schmalen Enden der auf einander folgenden Stanniolblätter über die entgegengesetzten Seiten der Wachspapiere hinüberragen. Sie werden daselbst umgefaltet und zusammengepresst. Auf diese Weise stellen die Stanniolblätter zwei grosse Metalloberflächen dar, die

durch Wachspapier von einander getrennt sind. Auch kann man, wie in den Apparaten von Stöhrer, eine Anzahl mit einander verbundener Franklin'scher Tafeln von dünnem Glase oder Hartgummi als Condensator verwenden.

Durch die Verbindung der beiden Elektroden der Unterbrechungsstelle des inducirenden Stromes mit den Oberflächen des Condensators wird die Dichtigkeit der daselbst bei der Unterbrechung sich aufhäufenden freien Elektricitäten vermindert, indem sie sich auf den Flächen des Condensators ansammeln. Der durch den Oeffnungsfunken eingeleitete, durch jene Elektricitäten gebildete Lichtbogen, welcher sonst noch einige Zeit die Leitung vermitteln würde, kann daher nicht zu Stande kommen. Die Unterbrechung geschieht schneller, der Oeffnungsstrom in der Inductionsspirale entwickelt sich in kürzerer Zeit. Der Oeffnungsfunken wird auf diese Weise geschwächt. Wird dann wiederum der Stromkreis an der Unterbrechungsstelle geschlossen, so entladet sich der Condensator durch dieselbe wieder; man bemerkt daselbst einen starken Funken bei der Schliessung [1]).

Bei der Anwendung des Condensators tritt die Wirkung des Metalls der Spitzen auf die Schlagweite der Funken der Inductionsrolle weniger hervor. Dieselbe betrug u. A. nach Rijke zwischen Spitzen von:

	Platin	Silber	Palladium	Gold	Kupfer	Coaks
ohne Condensator	13	9,2	8,1	2,3	4,7	0,5 mm
mit Condensator	14	13,9	13,7	13,0	12,5	0,9

Je kräftiger der Condensator die freien Elektricitäten an der Unterbrechungsstelle bindet, desto mehr vermindert sich die Helligkeit des Oeffnungsfunkens, desto heller wird aber der Entladungsfunken bei der nachher folgenden Schliessung. Daher ist bei sehr schwacher, ebenso wie bei sehr starker Wirkung des Condensators die Helligkeit der einen oder anderen Funken am bedeutendsten; bei einer mittleren aber geringer. — Die Entladungsfunken sind namentlich bei kleineren Condensatoren sehr hell und sehr heiss, da dann die Dichtigkeit der in denselben aufgehäuften Elektricitäten bedeutend ist. Die Hitze kann so bedeutend sein, dass sie, wenn die Unterbrechung zwischen Platinspitzen geschieht, wie bei Anwendung des Halske'schen Hammers als Interruptor des inducirenden Stromkreises, zusammengeschweisst werden [2]).

Verbindet man den Condensator durch einen 40 bis 50 m langen, dünnen (etwa 0,5 mm dicken) Neusilberdraht mit der Unterbrechungsstelle, so wird die Entladungszeit desselben vergrössert und so die Hitze der Funken verkleinert, das Zusammenschweissen der Platinelektroden wird vermieden. Zugleich wird aber auch die Ladungszeit des Conden- 424

[1]) Vergl. Rijke, Pogg. Ann. 107, p. 67, 1856*. Sinsteden, Pogg. Ann. 96, p. 353, 1855*. — [2]) Poggendorff, Pogg. Ann. 94, p. 316, 1855*.

sators verlängert und seine die Zeitdauer der Inductionsströme verkürzende Wirkung verringert [1]).

Da sich die beim Oeffnen der Leitung des inducirenden Stromes an der Unterbrechungsstelle auftretenden Elektricitäten hauptsächlich in Folge des dabei inducirten Extrastromes bilden, so wirkt der Condensator um so kräftiger, je stärker dieser Strom hervortritt; desto grösser muss aber auch seine condensirende Oberfläche sein. Dies ist z. B. der Fall, wenn die Intensität des inducirenden Stromes gross und der Draht der inducirenden Rolle sehr lang ist. — Ist ferner die Inductionsrolle aus einem sehr langen und dünnen Draht gewickelt, so wirkt der in ihr beim Oeffnen der inducirenden Rolle erzeugte Inductionsstrom auf letztere zurück und erzeugt in ihr einen starken Extrastrom. Auch hier verstärken grosse Condensatoren die Wirkung bedeutender, als kleinere.

Der Condensator wirkt dagegen weniger, wenn die Unterbrechung des inducirenden Stromes sonst schon auf eine andere Art bedeutend beschleunigt ist; so z. B. wenn sie unter Wasser oder Alkohol geschieht (wobei indess doch noch eine Wirkung des Condensators wahrzunehmen ist), oder noch weniger, wenn sie im luftverdünnten Raume vor sich geht.

Wenn auch nach den vorherigen Angaben die Zeit der Bildung der Inductionsströme durch den Condensator verkürzt, ihre in der Zeiteinheit entwickelte elektromotorische Kraft in demselben Verhältniss gesteigert wird, und ebenso ihre Fähigkeit, Funkenentladungen (namentlich in gewöhnlicher Luft) und physiologische oder mechanische Wirkungen hervorzubringen, verstärkt wird, so ändert die Anwendung desselben selbstverständlich die Gesammtgrösse der bei der Oeffnung oder Schliessung des inducirenden Kreises in der Inductionsrolle inducirten elektromotorischen Kraft nicht, da diese in allen Fällen dem völligen Entstehen oder Verschwinden des inducirenden Stromes und des Magnetismus des Eisenkernes entspricht. — Man kann dies auch beobachten, wenn man in den Schliessungskreis der Inductionsrolle ein Galvanometer einschaltet. Bei einmaligem Oeffnen oder Schliessen des inducirenden Stromes erhält man gleiche Ausschläge, mag der Condensator mit den Elektroden der Unterbrechungsstelle verbunden sein oder nicht [2]).

425 Einen genaueren Einblick in die Wirksamkeit des Condensators erhält man, wenn man die Aenderungen der elektromotorischen Kraft des inducirenden Stromes nicht plötzlich, sondern periodisch vornimmt, so z. B., indem die durch den Interruptor *A*, Fig. 109, und die inducirende Spirale *S* geleiteten Ströme durch eine Magnetelektrisirmaschine *B* erregt werden [3]). *D* sei der mit den Contactstellen des Interruptors verbundene Condensator. Wir können dann die elektromotorische Kraft

---

[1]) Poggendorff, l. c.; vergl. Riess, Pogg. Ann. 91, p. 355, 1854*. — [2]) Vgl. Poggendorff, l. c. — [3]) Maxwell, Phil. Mag. [4] 35, p. 360, 1868*.

des inducirenden Stromes gleich $Mn\cos nt$ setzen, wo n der Drehungswinkel in der Zeiteinheit, t die Beobachtungszeit ist. Bei Anwendung einer Magnetelektrisirmaschine ist $M\sin t$ das jedesmalige magnetische Moment des Ankers.

Fig. 109.

Der Widerstand in B und S zusammen sei gleich R, das Potential der Spirale S auf sich selbst gleich P, die variable Intensität in derselben I_0, die Capacität des Condensators gleich C, und die Differenz der elektrischen Potentiale seiner beiden Belegungen gleich Φ. Endlich sei der Widerstand des Interruptors A gleich r, die variable Stromintensität in demselben gleich I_r. Dann ist im Kreise DA

$$I_r . r = \Phi.$$

Zugleich steigt die Ladung des Condensators in jeder Zeiteinheit um

$$C\frac{d\Phi}{dt} = I_0 - I_r.$$

In dem Kreise BSD ist

$$Mn\cos nt + P\frac{dI_0}{dt} + \Phi = I_0 R$$

in welcher Gleichung wir

$$I_0 = A\cos(nt + \alpha)$$

setzen können, wo A und α Constante sind. Werden diese aus den früheren Gleichungen eliminirt, so ist

$$A^2 = \frac{M^2n^2(1 + C^2r^2n^2)}{r^2\{(1 - PCn^2)^2 + R^2C^2n^2\} + 2Rr + R^2 + P^2n^2}.$$

Setzen wir zuerst $r = 0$, ist also der Condensator durch Schliessung des Interruptors aus dem primären Inductionskreis ausgeschaltet, so ist

$$A^2 = \frac{M^2n^2}{R^2 + P^2n^2} \cdot \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 1)$$

Ist $r = \infty$, also der Interruptor geöffnet und der Condensator in den Kreis eingefügt, so ist

$$A_1^2 = \frac{M^2n^2}{R^2 + \left(Pn - \frac{1}{Cn}\right)^2} = \frac{M^2n^2}{R^2 + P^2n^2 + \frac{1}{C^2n^2} - 2\frac{P}{C}} \; . \; . \qquad 2)$$

In der ersten Gleichung kommt C nicht vor; der Condensator hat also bei Schliessung des Interruptors auf die Intensität des Stromes I_0 und ihre Aenderungen keinen Einfluss. Beim Oeffnen vergrössert seine

Einschaltung den Werth A_1, wenn $CPn^2 > 1$ ist. Es muss also hierzu die Capacität des Condensators C oder das Potential P der inducirenden Spirale auf sich selbst gross genug sein oder die Aenderung der elektromotorischen Kraft des stromerregenden Apparates schnell genug erfolgen, n also genügend gross sein. Den Maximaleffect erhält man, wenn $CPn^2 = 1$, also $A_1 = Mn/R$ ist.

Die Steigerung der Intensität in der inducirenden Spirale wirkt selbstverständlich auf die in der Inductionsspirale inducirten Ströme zurück [1]).

Dass in der That auf diese Weise eine Verstärkung der Intensität des Stromes in der inducirenden Spirale beim Oeffnen des Interruptors durch den Condensator eintritt, hat u. A. Grove [2]) gezeigt. Verband er die Pole der Inductionsrolle einer Magnetelektrisirmaschine mit der primären Spirale eines Ruhmkorff'schen Inductoriums, während der Interruptor desselben geöffnet, also der Condensator mit der primären Spirale direct verbunden war, so erhielt er von der Inductionsspirale des Ruhmkorff'schen Apparates starke Funken, nicht aber, wenn der Interruptor geschlossen, der Condensator also ausgeschaltet war. Analog muss sich die Wirkung des Condensators bei der Magnetisirung von Stahlnadeln verhalten [3]).

426 Selbstverständlich kann man ohne Interruptor statt der das Inductorium erregenden Kette eine dynamoelektrische Maschine verwenden, welche z. B. abwechselnd gerichtete Ströme durch die inducirende Rolle sendet [4]). Der Verlauf der alternirenden Ströme in der Inductionsrolle ist dann ein gleicher.

427 Ueber den Verlauf der Ströme des Inductoriums mit und ohne Anwendung des Condensators hat auch Thalén [5]) einige Versuche angestellt. Er schloss oder öffnete den inducirenden Kreis eines Poggendorff-Stöhrer'schen Inductoriums, indem er in ein Gefäss, in welches ein mit dem einen Pol der Säule verbundener verticaler Draht hineingesenkt war, aus einem anderen Gefäss Quecksilber mit einer bestimmten Geschwindigkeit einfliessen oder dasselbe aus dem ersten Gefäss ausfliessen liess. Das Quecksilber war mit dem anderen Pol der Säule verbunden. Bei anderen Versuchen wurde die Unterbrechung durch ein Pendel bewirkt, welches bei verschieden weiten Elongationen vermittelst einer Hebelvorrichtung einen Messingcylinder von einem anderen, mit seiner Axe

---

[1]) Eine Theorie der Wirkung der einzelnen Theile des Inductoriums ist auch von Börnstein, Pogg. Ann. **147**, p. 481, 1872* gegeben worden. — [2]) Grove, Phil. Mag. [4] **35**, p. 184, 1868*. — [3]) Vergl. auch Strutt, Phil. Mag. [4] **33**, p. 9, 1869*, **39**, p. 428, 1870*. — [4]) Spottiswoode, Phil. Mag. [5] **8**, p. 390, 1879*; Beibl. **4**, p. 150*. — [5]) Thalén, Oefvers af. K. Vetensk. Acad. Förhandl. 1860, p. 57; Fortschr. der Physik, 1863, p. 475*; vergl. auch Pogg. Ann. **112**, p. 125, 1861*.

gegen die des ersteren senkrecht gerichteten Messingcylinder mit verschiedener Schnelligkeit abhob. Vermittelst der Methode von Weber (Bd. III, §. 60) durch gleichzeitige Beobachtung des Elektrodynamometers und Galvanometers fand er hierbei das Verhältniss der Dauer des Oeffnungs- und Schliessungsinductionsstromes u. A wie 1 : 1,237, das Verhältniss der mittleren Intensitäten wie 1,235 : 1, während ihre Gesammtintensitäten (die Ausschläge des Galvanometers durch beide Ströme) gleich sind. Je schneller die Oeffnung erfolgt, desto kürzer ist die Dauer des Inductionsstromes. Findet statt der Oeffnung und Schliessung nur eine Veränderung der Stromintensität durch Ein- und Ausschalten einer Nebenschliessung statt, so ist die Dauer und mittlere Intensität beider Ströme fast gleich und stimmt ganz mit den Berechnungen des Bd. IV, §. 141 u. f. überein. Befindet sich neben der inducirenden Spirale noch eine in sich geschlossene Spirale, so verzögern sich beide Inductionsströme und vermindert sich ihre mittlere Intensität entsprechend. — Eisenkerne verzögern die Dauer der Ströme, namentlich des Oeffnungsstromes, wogegen namentlich die mittlere Intensität des Schliessungsstromes steigt. — [Bei den Versuchen von Rijke (Bd. IV, §. 162) ergab sich das umgekehrte Resultat, dort war indess den Extraströmen zu ihrer Entwickelung eine geschlossene Bahn geboten, die hier beim Oeffnen des Kreises fehlt.]

Ein mit dem Interruptor verbundener Condensator vergrössert ebenfalls die Dauer der Inductionsströme, namentlich indess für den Schliessungsstrom, während die mittlere Intensität des Oeffnungsstromes steigt. Die Unterbrechung des Stromes bei Trennung zweier fester Metallelektroden in Alkohol oder Terpentinöl ändert kaum die Zeitdauer der Ströme und ihre mittlere Intensität. Nur wenn, wie beim Herausheben und Eintauchen einer Stahlspitze in Quecksilber unter Alkohol u. s. f., die Oeffnung und Schliessung durch die Adhäsion des Quecksilbers an die Stahlspitze und die Wellenbewegungen desselben unter mehrfacher Wiederherstellung und Unterbrechung des Stromes geschieht, erscheint die Dauer des Extrastromes verlängert.

428 In den Inductorien bildet sich bei der Schliessung der inducirenden Spirale ein geschlossener Kreis, in welchem sich der Anfangsextrastrom entwickelt, wobei zugleich die Magnetisirung des Eisenkernes verzögert wird. Bei der Schliessung wird also die elektromotorische Kraft während einer längeren Zeitdauer inducirt, sie ist in jeder Zeiteinheit kleiner. Beim Oeffnen des inducirenden Stromes bildet sich dagegen kein solcher geschlossener Kreis, die Unterbrechung des inducirenden Stromes geschieht plötzlich, der Oeffnungsstrom in der inducirenden Spirale verfliesst schnell, was auch noch durch die besonderen, oben beschriebenen Hülfsmittel befördert wird; der hierbei inducirte Oeffnungsstrom in der Inductionsspirale entwickelt sich in sehr kurzer Zeit; er besitzt also bei gleicher Gesammtintensität in der Zeiteinheit eine grössere elektromotorische Kraft als der Schliessungsstrom.

Verbindet man daher zunächst die Enden der Inductionsrolle unmittelbar mit einander und schaltet in ihren Schliessungskreis ein Galvanometer ein, so zeigt dasselbe die durch die abwechselnde Wirkung der entgegengesetzt gerichteten Oeffnungs- und Schliessungsströme verursachte doppelsinnige Ablenkung. — In einem Voltameter werden durch diese Ströme Sauerstoff und Wasserstoff an beiden Elektroden entwickelt; aus Jodkaliumkleister wird beiderseits Jod abgeschieden [1]).

Schaltet man aber zwischen die Enden der Inductionsrolle einen Körper von sehr grossem Widerstand ein, verbindet man sie z. B. mit zwei kleinen Metallplatten, zwischen die man ein Stück trockenes Fliesspapier gelegt hat, so zeigt das in den Stromkreis der Inductionsrolle eingeschaltete Galvanometer eine stetige Ablenkung nach der einen Seite, welche angiebt, dass nur der beim Oeffnen der Hauptrolle inducirte Strom durch die Papierschicht hindurchgegangen ist [2]).

Aehnliche Unterschiede ergeben sich, wenn die von den Enden der Inductionsrolle ausgehenden Drähte in einiger Entfernung in gewöhnlicher oder verdünnter Luft einander gegenüberstehen. Auch hier kann hauptsächlich nur der Oeffnungsstrom unter Funkenbildung übergehen; ein in den Stromkreis eingeschaltetes Galvanometer zeigt die diesem letzteren entsprechende Ablenkung (siehe das Capitel „Entladung in Gasen“).

429 Lässt man die Entladungen einer Holtz'schen oder anderen Elektrisirmaschine durch den dünnen Draht der Inductionsrolle eines Ruhmkorff'schen Inductoriums gehen, so entstehen in der dickdrahtigen inducirenden Rolle Inductionsströme, welche sich ganz ähnlich wie die Ströme der Säule verhalten [3]). Man schaltet dabei zweckmässig in den Kreis des inducirenden Stromes einen nicht zu grossen Condensator und eine oder mehrere Funkenstrecken ein.

Die inducirten Ströme haben abwechselnde Richtung; zeigen aber sonst alle Wirkungen der gewöhnlichen galvanischen Ströme; sie lenken die Galvanometernadel direct nicht, wohl aber unter Einschaltung eines Interruptors ab, zersetzen Wasser, geben beim Ueberführen der Elektroden über eine Feile Funken, erzeugen zwischen zwei Kohlen das elektrische Licht, magnetisiren Eisenstücke u. s. f. Werden sie durch ein zweites Inductorium geleitet, so erzeugen sie in ihm die gewöhnlichen hochgespannten Inductionsströme.

Bei genügender Länge der Funkenstrecke sind indess die Ströme nur einseitig, dem inducirenden Strom entgegengerichtet und zersetzen

---

[1]) Für diese Zwecke hat man auch die Richtung der Inductionsströme gleich zu machen gesucht, indem man mit dem Interruptor noch einen eigenen Commutator verband. Die nähere Einrichtung dieses Apparates von Heidenreich siehe Pogg. Ann. **97**, p. 275, 1856*. — [2]) Poggendorff, Pogg. Ann. **94**, p. 309, 1855*. — [3]) Govi, Rendic. di Napoli **21**, p. 108, 1882*; Beibl. **6**, p. 892*.

in diesem Sinne Wasser und Kupfervitriollösung [1]). Es kommt dies daher, dass bis zur Ladung der Elektroden des Funkens eine lange Zeit vergeht, also die dabei entstehende Schliessungsinduction sehr langsam stattfindet, während der Funken sich sehr plötzlich bildet und so die Dichtigkeit der Ablagerung der Ionen durch den bei der Entladung gebildeten Inductionsstrom sehr viel grösser ist, letztere also in Gasform und Blasen entweichen. Bei der Anwendung von Eisenkernen treten diese Erscheinungen viel energischer hervor. — Auch kann man in die inducirende Rolle die Inductionsströme eines zweiten Inductoriums unter Einschaltung eines Funkenraumes eintreten lassen. Wird letzterer fortgelassen, so ist die Zersetzung des Wassers bipolar [2]).

Durch eine Geissler'sche Röhre kann man in der Inductionsrolle die Stromesrichtung nachweisen.

430 Schaltet man neben einer sehr langen Drahtrolle in den Schliessungskreis des Inductoriums ein elektrisches Ei (s. w. u.) und ein Galvanometer ein, so sinkt bei Einschieben von Eisendrahtbündeln in die Drahtrolle die Stromintensität bedeutend und die Lichterscheinung im Ei nimmt ab.

Es muss also in der Drahtrolle beim Entstehen des Inductionsstromes ein Gegen- (Extra-) ström inducirt worden sein, der seine mittlere Intensität schwächt und durch die Eisendrahtbündel verstärkt wird.

Schiebt man dagegen in die Drahtrolle eine zweite geschlossene Drahtrolle, so wird auch in dieser ein Strom durch den entstehenden Inductionsstrom inducirt, welcher auf die umliegende Spirale rückwirkend den Gegenstrom in derselben schwächt.

Diese Erscheinungen beruhen auf der Bildung der Extraströme, welche die Inductionsströme in den in ihren Kreis eingeschalteten Drahtrollen induciren, da alle Ursachen, die die Bildung der Extraströme verstärken (Eisendrahtbündel, Verlängerung der eingeschalteten Drahtrolle u. ff.), die mittlere Intensität, also auch die Spannungsdifferenz des Inductionsstromes an den Elektroden des elektrischen Eies vermindern, und so nur ein geringerer Theil der Elektricitäten zwischen denselben übergeht und umgekehrt [3]).

---

[1]) Bichat, Compt. rend. **78**, p. 1086, 1874*; Ann. de Chim. et de Phys. [5] **6**, p. 391, 1875*. — [2]) Bichat, Mondes **37**, p. 335, 1875*; vergl. auch Neyreneuf, Ann. de Chim. et de Phys. [5] **7**, p. 572, 1876*. — [3]) Poggendorff, Pogg. Ann. **121**, p. 307, 1864*. Ueber die Verbindung mehrerer Inductoren neben und hinter einander siehe Foucault, Compt. rend. **42**, p. 215, 1856* und Poggendorff, Pogg. Ann. **94**, p. 332, 1855*.

II. Magnetoelektrische Inductionsapparate.

431 In vielen Fällen, namentlich bei Widerstandsbestimmungen, ist es wünschenswerth, zu bestimmten Zeiten Ströme von ganz constanter Intensität verwenden zu können. Hierzu dienen sehr gut die magnetoelektrischen Ströme, welche durch einen früher schon von Gauss und W. Weber[1]) angewandten und neuerdings von W. Weber[2]) verbesserten Inductor erhalten werden können. Der letztere Inductor besteht aus zwei cylindrischen Magnetstäben *ns* und *n's'*, Fig. 110, von 300 mm Länge und 15 mm Dicke, welche in einem Abstand von

Fig. 110.

150 mm in entgegengesetzter Lage in einer Holzröhre befestigt sind. Diese Röhre wird in einem Holzkasten durch einen Hebelapparat mit Tritt gehoben und gesenkt. Auf dem Deckel des Kastens befindet sich eine Inductionsspirale *G G*, durch welche die Holzröhre hindurchgeht. Bei dem höchsten und niedrigsten Stande derselben entspricht die Mitte der Inductionsrolle der Mitte des untersten oder obersten Magnetes. Durch abwechselndes Heben der Röhre mittelst des Trittes kann man in bestimmten Momenten Inductionsströme von entgegengesetzter Richtung erhalten.

Einen anderen Apparat zur Erregung regelmässig ihre Intensität und Richtung wechselnder Inductionsströme, den Sinusinductor von F. Kohlrausch, haben wir schon Bd. I, §. 456 beschrieben.

[1]) Gauss und Weber, Resultate des magnetischen Vereins 1838, p. 86*. — [2]) W. Weber, Elektrodyn. Maassbest. 2, p. 335, 1846*.

432 Man hat ferner vielfach versucht, durch Benutzung der Inductionswirkungen von Stahl- oder Elektromagneten auf Drahtspiralen inducirte Ströme von bedeutender elektromotorischer Kraft hervorzurufen, welche theils zu wissenschaftlichen, theils zu praktischen Zwecken verwendet wurden. — Wir beschreiben zuerst die Apparate, bei denen durch Stahlmagnete inducirte Ströme erzeugt werden; die wichtigsten der sogenannten Magnetelektrisirmaschinen.

Die ältesten Maschinen dieser Art wurden von Pixii[1]), Fig. 111, construirt. Ein vertical mit seinen Schenkeln nach unten gestelltes Hufeisen von weichem Eisen diente als Anker. Seine Schenkel waren mit Drahtspiralen umgeben. Unter denselben rotirte ein hufeisenförmiger Stahlmagnet um eine verticale Axe, so dass seine Pole bei den Endflächen des Ankers vorbei gingen. Die in den Spiralen bei der Rotation des Magnetes inducirten und abwechselnd gerichteten Ströme konnten vermittelst eines, durch die Maschine selbst bewegten Commutators in gleicher Richtung in den mit dem letzteren verbundenen Schliessungskreis eingeführt werden.

Fig. 111.

Mit dieser Maschine hat man Wasser zersetzt, sowie alle übrigen Wirkungen der galvanischen Ströme auch an den Inductionsströmen nachgewiesen[2]).

Später wurde die Maschine abgeändert von Ritchie[3]), Saxton[4]), Clarke[5]), Petrina[6]), von Ettingshausen[7]) und Anderen. Bei allen diesen Einrichtungen hat man Anker, welche aus einem mit Draht-

[1]) Pixii, Ann. de Chim. et de Phys. 50, p. 322, 1832*. Schon früher hatte Dal Negro, Phil. Mag. [3] 1, p. 45, 1832*, eine solche Maschine construirt. — [2]) Hachette, Phil. Mag. [3] 51, p. 72*. Ampère, Phil. Mag. [3] 51, p. 76, 1832*; Pogg. Ann. 27, p. 390 bis 398*. — [3]) Ritchie, Phil. Trans. 1833, 2, p. 320*; Pogg. Ann. 32, p. 539*; Phil. Mag. 8, p. 455, 1836*; Pogg. Ann. 39, p. 406*. — [4]) Saxton, Phil. Mag. 9, p. 360, 1836* (schon 1833 construirt); Pogg. Ann. 39, p. 401*. — [5]) Clarke, Phil. Mag. 9, p. 262, 1836*; Pogg. Ann. 39, p. 404*. — [6]) Petrina, Pogg. Ann. 54, p. 58, 1845*; und Magnetoelektrische Maschine etc. Linz 1844*. — [7]) von Ettingshausen, Gehler's Wörterb. 9, p. 122, 1838*.

spiralen umgebenen Hufeisen bestehen, vor dem ruhenden hufeisenförmigen Stahlmagnet rotiren lassen, und zwar in zwei verschiedenen Arten; einmal, wie bei der Maschine von v. Ettingshausen, Clarke, Fig. 112 u. s. f. um eine gegen die Ebene der Schenkel des Magnetes normale Axe neben den Magnetpolen. Bei der Maschine von v. Ettingshausen

Fig. 112.

Fig. 113.

waren ausserdem noch auf die Polenden des horizontal liegenden Magnetes, unter denen der Anker um eine verticale Axe rotirte, einige hufeisenförmige, magnetisirte Stahllamellen vertical aufgesetzt, um die Polarität der ersteren zu verstärken. — Bei der Saxton'schen Maschine, Fig. 113, rotirte der Anker im Gegentheil um eine den Schenkeln des horizontal liegenden Magnetes parallele und zwischen ihnen liegende Axe, so dass die Endflächen der Schenkel des Ankers in einer gegen die Ebene der Schenkel des Magnetes senkrechten Ebene bei seinen Polen vorbeigingen. — Die Enden der Inductionsspiralen D, D_1 auf den Ankern waren mit zwei, auf die Rotationsaxe isolirt aufgesetzten Metallringen b und c, Fig. 114, verbunden, von denen der eine eine runde Metallplatte, der andere zwei diametral einander gegenüberstehende Spitzen trug. Der Rand der Metallplatte, sowie die Spitzen tauchten in einen Quecksilbernapf. Bei der Rotation des Ankers vor den Magnetpolen ändert sich sein magnetisches Moment, und dieser Aenderung proportional werden in den, den Anker umgebenden Inductionsspiralen D Ströme inducirt. Dieselben haben also nahezu die grösste elektromotorische Kraft, wenn sich der Anker in der Ebene der Schenkel des Magnetes befindet (s. w. u.). Stellt man daher den Metallring b mit den Spitzen so, dass dieselben sich aus dem Quecksilber heben, während der Anker durch jene Lage hindurchgeht, so erhält man einen lebhaften Oeffnungs-

Fig. 114.

funken. Theilt man den Quecksilbernapf in zwei getrennte Abtheilungen, in welche die Scheibe *c* und die Spitzen *b* eintauchen, und verbindet die Abtheilungen durch Handhaben mit den Händen, so erhält man beim Heraustreten der Spitzen aus dem Quecksilber eine Erschütterung, welche durch den, bei Unterbrechung des Inductionsstromes erzeugten Extrastrom hervorgerufen ist [1]). — Bei den übrigen Maschinen ist meist auf die Rotationsaxe des Ankers ein Cylinder von Holz, Horn, Hartgummi oder Elfenbein aufgeschoben, welcher auf seiner Oberfläche mit Metalleinlagen versehen ist, die mit den Enden der Inductionsspiralen verbunden sind. Gegen diese Einlagen schleifen bei der Drehung des Ankers Metallfedern, welche die Fortleitung der Inductionsströme in der einen oder anderen Weise vermitteln.

Bei diesen Maschinen ist die elektromotorische Kraft des Stromes, welcher in den den Anker umgebenden Spiralen inducirt wird, um so grösser, je grösser in der Zeiteinheit die Aenderung des Magnetismus des Ankers bei seiner Rotation ist. — Bei den Maschinen, bei welchen der Anker, wie bei der Saxton'schen Maschine, vor den Magnetpolen rotirt, dürfte es deshalb zweckmässig sein, die den Polflächen des Magnetes gegenüberliegenden Polflächen der Anker den ersteren etwa gleich zu machen, da dann der Anker nur einen Augenblick das Maximum des in ihm durch den Magnet erzeugten Magnetismus erlangt. — Die Maschinen, bei denen der Anker über oder unter den Magnetpolen in einer den Schenkeln des Magnetes parallelen Ebene rotirt, haben dagegen den Nachtheil, dass der Magnetismus der Anker auf ihrem ganzen Wege über der Fläche der Schenkel des Magnetes nur langsam wechselt und die Anker auch nur verhältnissmässig schwachen magnetisirenden Kräften ausgesetzt sind. Hierbei ist also die Induction schwächer und sie wird nur in den Momenten bedeutender, in denen die Eisencylinder der Anker von dem einen Schenkel zum anderen übergehen. Die Maschinen äussern in diesen Momenten bedeutendere physiologische Wirkungen, als die anderen Maschinen, bei denen der Anker vor den Polen rotirt, und eine so plötzliche Aenderung der Magnetisirung nicht eintritt. — Je näher die Schenkel an einander liegen, desto kürzer ist dieser Moment des Ueberganges, desto grösser die in demselben inducirte elektromotorische Kraft [2]).

Wir begnügen uns mit der genaueren Beschreibung der allgemeiner angewandten Stöhrer'schen Magnetelektrisirmaschine, Fig. 115, 116, 117 und 118. Vor den Polen eines horizontal liegenden, aus mehreren Lamellen bestehenden, hufeisenförmigen Stahlmagnetes wird ein Anker durch einen Trieb, welcher auf seine in eisernen Spitzen laufende Axe 433

---

[1]) Eine Einrichtung, um bei dieser Maschine gleichgerichtete Ströme zu erhalten, s. Poggendorff, Pogg. Ann. 45, p. 391, 1838*. — [2]) Vergl. auch Sinsteden, Pogg. Ann. 76, p. 524, 1849*.

aufgesetzt ist, vermittelst eines Schwungrades und eines Schnurlaufes in Rotation versetzt. Der Anker RR' des Magnetes besteht aus zwei cylinderförmigen, am besten ausgehöhlten und an der Seite aufgeschlitzten Eisenstäben, welche man zweckmässig durch Bündel von dün-

Fig. 115.

nem Eisendraht ersetzen kann. Diese Stäbe sind fest auf die Eisenplatte AA aufgeschraubt, die wiederum an der Rotationsaxe befestigt ist. Die Enden der letzteren laufen in Lagern, welche sich durch Schrauben verstellen lassen, so dass man den Anker den Endflächen des Magnetes beliebig nähern oder von denselben entfernen kann. Auf die Eisencylinder sind die Inductionsspiralen aus übersponnenem Kupferdraht aufgesetzt. Die Enden derselben (1, 2, 3, 4, Fig. 116) sind mit

vier Kupferplättchen verbunden, welche auf ein auf der Rotationsaxe befestigtes flaches Stück Holz aufgeschraubt sind, und zwar so, dass die Plättchen 1 und 2 mit den einen, bei der Drehung des Ankers gleichartig elektrisirten, die Plättchen 3 und 4 mit den entgegengesetzt elektrisirten Enden der beiden Spiralen in Verbindung stehen, so dass

Fig. 116.

Fig. 117.

Fig. 118.

also die Enden der einen Spirale in 1 und 3, die der anderen in 2 und 4 enden.

Auf dem Holzstück ist ein „Pachytrop“ angebracht, durch den man die Ströme der Spiralen beliebig weiter leiten kann. Vor den Plättchen 1 bis 4 dreht sich an einem Hebel eine Elfenbeinplatte, welche zwei gabelförmige Stücke Kupfer trägt. Diese schleifen auf den Plättchen und können je nach der Stellung des Hebels die Plättchen 1 und 2, 3 und 4 oder auch nur 2 und 3 mit einander leitend verbinden. Im ersteren Fall sind die Drahtrollen auf dem Anker neben einander verbunden; in zweiten hinter einander.

Die in den beiden Spiralen auf dem Anker inducirten Ströme haben in jedem Augenblick der Drehung entgegengesetzte Richtung, da der eine Strom bei der Annäherung oder Entfernung des Ankers am Nordpol, der andere am Südpol des Magnetes entsteht. Durch den Pachytrop werden deshalb die nicht einander entsprechenden Enden der Inductionsspiralen mit einander verbunden. Von den Plättchen 1 und 4 führen zwei Drähte *k* und *h* zu einem, auf die Rotationsaxe aufgesetzten Commutator, Fig. 117 und Fig. 118. Derselbe besteht aus zwei concentrischen

und von einander isolirten Metallröhren *m* und *n*, welche auf die Rotationsaxe des Ankers isolirt aufgeschoben und mit den Drähten *k* und *h* verbunden sind. Sie tragen halbkreisförmige, abgerundete, stählerne Wülste, von denen 1 und 4 auf die Walze *n*, 2 und 3 auf die Walze *m* gelöthet sind. Diese Wülste liegen einander gerade gegenüber. Darauf schleifen die gespaltenen Federn *S* und *T* mit ihren gabelförmigen Enden *c*, *d*, *f*, *g*. Ist der Commutator so gestellt, dass beim Wechsel der Richtung der Inductionsströme in den Spiralen des rotirenden Ankers die Federn von dem einen Wulst zu dem benachbarten übergehen, so bleibt in der zwischen denselben eingeschalteten Leitung die Stromesrichtung ungeändert [1]).

434 Eine nicht wesentlich die Wirkung der Magnetelektrisirmaschine vermehrende, die Maschine sehr vertheuernde Veränderung ist die, dass man statt eines stählernen Hufeisenmagnetes deren zwei anwendet, welche in einer Ebene so hingelegt werden, dass sie einander ihre ungleichnamigen Pole zukehren. Man lässt den Anker, dessen mit Spiralen umgebene Eisencylinder nicht mehr durch ein Querstück von weichem Eisen verbunden sind, zwischen den Polen der beiden Magnete in einer auf ihrer Ebene normalen Ebene rotiren, so dass die Axen jener Eisencylinder bei dem Vorbeigang vor den Magnetpolen in die Verbindungslinien der letzteren fallen [2]).

Sehr viel besser ist es, hierbei nach Sinsteden [3]) die Anker um eine zwischen den Magneten befindliche, der Verbindungslinie ihrer Pole parallele Axe, Fig. 119, rotiren zu lassen, so dass sie bei der Rotation zwischen den Magnetpolen hindurchgehen. Sinsteden befestigte auf diese Art vier Drahtbündel von möglichst dünnem, weichem Eisendraht von $3^{1}/_{2}$ Zoll Länge, $1^{1}/_{2}$ Zoll Dicke und $1^{1}/_{2}$ Pfd. Gewicht, welche mit je 2 Pfd. von übersponnenem Kupferdraht in 840 Windungen umwickelt waren, an der Rotationsaxe. Die Windungen konnten alle hinter oder neben einander verbunden werden. Die Magnete wogen je $17^{1}/_{2}$ Pfd. und hatten eine Tragkraft von 110 Pfd. Ihre Schenkel hatten einen inneren Abstand von $3^{5}/_{8}$ Zoll und eine Dicke von $2^{1}/_{4}$ Zoll. Bei dieser

Fig. 119.

[1]) Eine ähnliche Maschine, bei welcher durch die mannigfaltigsten Verbindungen mittelst Federn, welche auf Rädern auf der Axe schleifen, die Ströme gleich oder abwechselnd gerichtet, oft unterbrochen werden, sowie Extraströme in der Inductionsspirale nachgewiesen werden können von Dove, Pogg. Ann. **56**, p. 251, 1842*. — [2]) Page, du Moncel, Exposé des applications de l'électricité, **1**, p. 360*; Jacobi, Pogg. Ann. **69**, p. 194, 1864*. — [3]) Sinsteden, Pogg. Ann. **92**, p. 220, 1854*.

Vorrichtung ist das magnetische Moment der Eisenkerne bei ihrem Durchgang durch die Ebene der Magnetpole sehr bedeutend. Die Anwendung der Drahtbündel vermindert das Auftreten der Extraströme und beschleunigt so die Aenderungen des Momentes. Zugleich würde bei Anwendung massiver Eisenkerne an Stelle der Drahtbündel, wenn dieselben bei ihrem allmählichen Vorbeigang bei den Magnetpolen zuletzt nur an der einen Seite hauptsächlich dem magnetisirenden Einflusse der Magnete ausgesetzt wären, die von dem Magnete abliegende Seite derselben gewissermaasen als Anker zu der ersteren dienen, und so würden sich die magnetischen Molecüle in den Kernen in geschlossenen Kreisen lagern, aus denen sie bei der Entfernung der Kerne von den Magnetpolen nicht völlig heraustäten, um wieder ihre unmagnetische Gleichgewichtslage anzunehmen. Bei Anwendung der Drahtbündel können sich solche geschlossene Kreise nicht bilden, und der Magnetismus derselben verschwindet vollständiger.

Sehr zweckmässig ist die Construction der Magnetelektrisirmaschine von Werner Siemens. Sie besteht aus zwei Reihen, in entgegengesetzter Lage über einander geschichteter und durch schmale Zwischenräume getrennter Magnetstäbe G und G_1, Figur 120 (auf folgender Seite), welche einerseits an eine Eisenplatte angeschraubt sind. Andererseits sind dieselben zu einer cylindrischen Oeffnung ausgefeilt, in welcher sich vermittelst der Kurbel H, des Zahnrades L und des Triebes T ein Cylinder E drehen lässt. Der letztere, der sogenannte „Siemens'sche Anker", ist aus einem Eisenstab gebildet, dessen Querschnitt in nebenstehender Figur wiedergegeben ist. In die seitlichen Ausschnitte desselben sind, wie auf einen Galvanometerrahmen, der Länge nach Drahtwindungen gelegt, und über diese ist zum Schutze gegen äussere Beschädigungen eine Messinghülle gesteckt, auf deren Enden die Fassungen F aufgesetzt sind, welche die Zapfen tragen, auf denen sich der ganze Cylinder E dreht. Die Enden der Windungen sind mit zwei auf den unteren Zapfen aufgesetzten Metallrädern verbunden, gegen welche Federn schleifen, die die weitere Leitung vermitteln. Durch ähnliche Einrichtungen, wie bei der Dove'schen und Stöhrer'schen Maschine, kann man die Richtung der inducirten Ströme in ihrem Schliessungskreise beliebig abändern. Die Zähne i, welche eine unter der Kurbel H angebrachte Scheibe umgeben, dienen dazu, bei der Fortschiebung der Kurbel um je einen Zahn den Cylinder E um je eine halbe Umdrehung vorwärts drehen zu können, so dass man den dabei erzeugten einmaligen Inductionsstoss verwenden kann.

Der grosse Vortheil dieser Maschine beruht in der Anwendung einer grösseren Anzahl kleinerer Magnetstäbe an Stelle eines grösseren. Da erstere bei gleichem Gewicht viel mehr permanenten Magnetismus annehmen als letzterer, so ist die Wirkung der Maschine grösser. Auch ist

der Anker stets den magnetisirenden Magneten sehr nahe, erhält daher ein grosses Moment und ändert dasselbe sehr schnell[1]).

Der Siemens'sche Anker hat ferner den grossen Vorzug, dass seine Eisenmasse die Pole des Magnets so verbindet, dass bei seiner Rotation

Fig. 120.

kaum eine Aenderung der Schliessung des Magnets, also auch kaum eine Aenderung des Momentes des letzteren eintritt, und in Folge dieser Wirkung die den Magnetismus des Magnets vermindernden Inductionsströme in seiner Masse nicht in dem Maasse auftreten, als bei Anwendung anderer Anker[2]).

Sinsteden[3]) giebt eben deshalb den Polen der feststehenden Mag-

[1]) Siemens und Halske, Pogg. Ann. 101, p. 271, 1857*; auch Schellen's Telegraph, 3. Aufl., p. 213, 1861*. — [2]) Zur Vermeidung dieser Inductionsströme ersetzt Pellerin (Compt. rend. 77, p. 561, 1873*) den Siemens'schen Anker durch eine Säule von auf einander geschichteten Eisenblechplatten. — [3]) Sinsteden, Pogg. Ann. 137, p. 290, 483, 1869*.

nete Flügel von weichem Eisen, Fig. 121, so dass der Eisenkern beim Rotiren der Anker fast geschlossen bleibt, und der Schliessungsextrastrom im Eisen unterdrückt wird.

Fig. 121.

Eine andere Einrichtung der Magnetelektrisirmaschine ist von Page [1]) angegeben. Die Inductionsspiralen sind direct auf die Schenkel eines hufeisenförmigen Stahlmagnets geschoben. Vor den Polen desselben rotirt ein Anker von weichem Eisen. Auf die Rotationsaxe sind Metallräder aufgesetzt, deren Ränder, ähnlich wie bei der Dove'schen und Stöhrer'schen Maschine, mit Elfenbein ausgelegt oder ausgeschnitten sind und gegen welche Federn schleifen, von denen die eine mit dem einen Ende des Drahtes der Inductionsspiralen verbunden ist, die andere die Leitung zu dem weiteren Schliessungskreise der Inductionsströme vermittelt, zu welchem andererseits das andere Ende des Drahtes der Inductionsspiralen geführt ist. Durch geeignete Abänderung des Commutators kann man auch hier die Richtung der Inductionsströme in dem Schliessungskreise auf die eine oder andere Weise reguliren. In diesem Apparate werden die Inductionsströme in den Spiralen auf doppelte Weise inducirt; einmal indem der Anker beim Rotiren vor den Magnetpolen seine Polarität wechselt und so direct, indess doch aus ziemlich weiter Ent- **436**

[1]) Page, Annals of Electricity, 1839, p. 489*; vergleiche auch Verdet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 31, p. 192*; Krönig's Journ. 1, p. 364*; ähnlich auch Dujardin, Breton, Duchenne, du Moncel, Exposé des applications, 1, p. 365, und Dujardin, Compt. rend. 21, p. 892, 1845*. Derselbe hat auch vor die Schenkel eines hufeisenförmigen Magnets eine weitere Spirale gestellt, deren Axe den Schenkeln des Magnets parallel war und zwischen ihnen lag, und in der Spirale um jene Axe vor den Magnetpolen einen Eisenkern rotiren lassen, der durch ein auf der anderen Seite der Axe angebrachtes Gegengewicht von Blei äquilibrirt wurde (l. c. p. 528*). Auch diese Einrichtung erscheint wenig praktisch.

fernung inducirend auf die Spiralen wirkt, dann aber hauptsächlich dadurch, dass der temporäre Magnetismus des Ankers auf den Magnetismus des Magnets zurückwirkt und denselben in gewissen Lagen des Ankers verstärkt. — Sehr günstig ist diese Anordnung nicht, da die Aenderungen des Magnetismus in Magneten von hartem Stahl nicht so bedeutend sind, als im weichen Eisen.

Man kann selbstverständlich bei dieser Maschine auch noch die Eisenkerne des Ankers mit Drahtspiralen umgeben und die in letzteren inducirten Ströme zugleich mit den Inductionsströmen in den Spiralen auf den Schenkeln des Magnets verwenden [1]).

437 Man hat vielfach versucht, die Wirkung der Magnetelektrisirmaschinen zu verstärken, indem man die Zahl der Anker oder Magnetpole vermehrte. So hat z. B. Petrina (l. c.) an Stelle des gewöhnlichen Ankers der Maschinen einen aus vier Eisencylindern bestehenden benutzt, welche gegen ein Kreuz von Eisen gegengeschraubt waren.

Aehnlich hat auch Sinsteden [2]) früher eine Maschine construirt, bei welcher die Vortheile der (Bd. III, §. 104) erwähnten Magnetisirungsmethode und die Verstärkung der Polarität des hufeisenförmigen Stahlmagnets durch einen quer über seine Schenkel in einigem Abstand von den Polen gelegten Eisenstab benutzt waren. Die vier Eisenkerne waren durch Eisendrahtbündel ersetzt, wodurch die in ihrer Masse entstehenden Extraströme geschwächt wurden. Sie waren zu je zweien mit kürzeren und längeren Spiralen von dickem und dünnem Draht umwunden, um so leicht den Widerstand des inducirenden Apparates ändern zu können (vergl. auch §. 434).

438 Stöhrer [3]) hat bei seiner viel benutzten Maschine, Fig. 122, sowohl die Zahl der Anker, als auch die der Magnete vermehrt. Dieselbe besteht aus drei aufrecht gestellten, hufeisenförmigen Stahlmagneten, deren jeder aus fünf Lamellen zusammengesetzt ist. Darüber rotirt als Anker ein Eisenring, an welchen sechs Eisenkerne angeschraubt sind, die in der Ruhelage des Ankers den Magnetpolen gerade gegenüberstehen.

Die Eisenkerne der Anker sind 44 mm lang und 29 mm dick, die sie umgebenden Drähte von 1 mm Dicke sind auf dünne Holzrollen gewunden, welche auf die Eisenkerne gesteckt werden. Die zwölf Enden der Drähte der sechs Drahtrollen laufen in eine Holzbüchse aus, in welcher sie mit einem Pachytrop communiciren, der dem §. 433 beschriebenen ganz ähnlich ist, und von dem aus zwei Leitungsdrähte weiter gehen. Durch Drehung des Pachytrops können jene sechs Drahtrollen 1) alle neben einander, 2) zu zweien neben einander, zu dreien hinter einander, 3) zu

---

1) Vergl. Nollet und Gaiffe in du Moncel Exposé, 1, p. 373*. — 2) Sinsteden, Pogg. Ann. 76, p. 29 u. 195, 1849*. — 3) Stöhrer, Pogg. Ann. 61, p. 417, 1844*.

dreien neben einander, zu zweien hinter einander, 4) alle hinter einander verbunden werden.

Bei jeder Umdrehung des Ankers um seine Axe wechselt die Richtung der inducirten Ströme sechsmal. Um die Richtung derselben gleich zu machen, ist oben an der Axe ein Commutator befestigt. Derselbe ist ganz analog dem Commutator, Fig. 118, §. 433. Er besteht aus vier Stahlscheiben *abcd*, von denen *a* und *d*, sowie *b* und *c* metallisch verbunden, beide Paare aber von einander durch eine Buchsbaumhülse getrennt sind. Jedes dieser Systeme von Scheiben ist mit einem vom Pachytrop kommenden Leitungsdraht verbunden. Jede Scheibe hat an ihrem Rande

Fig. 122.

drei Ausschnitte (welche mit einer isolirenden Schicht ausgefüllt werden können). Gegen die Scheiben *ab* und *cd* schleifen die beiden Enden zweier gespaltener Federn, die mit den Klemmschrauben *e* und *f* verbunden sind. Bei richtiger Stellung des Commutators bleibt mit jedem Wechsel der Stromesrichtung in den Drahtrollen auf den Ankern dennoch die Stromesrichtung in der mit den Klemmen *e* und *f* verbundenen Leitung ungeändert [1]).

[1]) Eine andere Maschine von Niaudet, bei welcher zwei Hufeisenmagnete von Stahl mit ihren Schenkeln horizontal und je in einer Verticalebene paral-

439 Während die bisher beschriebenen Maschinen nur einzelne, von einander getrennte Inductionsstösse liefern, hat die Firma Siemens und Halske[1]) schon im Jahre 1855 in der Londoner Industrieausstellung eine Maschine für continuirliche Ströme von starker Spannung mit einer eigenthümlichen Art der Verbindung der Inductionsrollen mit dem Commutator ausgestellt, welche Verbindung nachher wiederholt von Pacinotti und Gramme verwendet worden ist.

Der Rand der Mantelfläche eines flachen Conus, welcher sich auf einer ebenen mit Stahlmagneten armirten Fläche abrollte, war mit kleinen, radial liegenden Hufeisenelektromagneten besetzt, deren Windungen hinter einander zu einem geschlossenen Kreise verbunden waren. Zwischen je zwei Elektromagneten war der Umwindungsdraht mit einzelnen Contactstücken verbunden, welche im Kreise um die mit zwei Schleiffedern versehene Drehungsaxe befestigt waren. Die Federn vermittelten jedesmal den Contact zu dem dem Stahlmagnet nächsten und fernsten Elektromagnet, so dass die in beiden entgegengerichteten Ströme sich in den Schleiffedern bei der Drehung zu einem continuirlichen Strom vereinten.

440 Das Princip dieser Drahtverbindung der Inductionsrollen ist bei einer im Jahre 1860 construirten Magnetelektrisirmaschine von Pacinotti[2]) beibehalten, dagegen sind dieselben statt auf einzelne Elektromagnete, auf einen geschlossenen Eisenring gewickelt. Ein Eisenring mit 16 Zähnen, Fig. 123, rotirt an vier Speichen, Fig. 124, um eine Axe. Auf die Zähne sind Holzkeile *mm* gesetzt und zwischen ihnen Drahtspiralen *rr* aufgewickelt, welche alle hinter einander verbunden sind. Von den Verbindungsstellen gehen Drähte die Rotationsaxe entlang zu isolirten, auf dieselbe in zwei über einander liegenden Kreisen befestigten Messingstücken, gegen welche Contactrollen schleifen, welche die in ihnen inducirten Ströme weiter leiten. Neben dem Ring stehen

Fig. 123.

lel neben einander aufgestellt werden, so dass die ungleichnamigen Pole je in einer Horizontalebene einander gegenüberstehen, zwischen welchen um eine horizontale Axe eine Reihe ihr paralleler, mit Spiralen umwundener Eisenstäbe rotirt, siehe Niaudet-Breguet, Mondes, **51**, p. 67, 1875* und Dingler's J. **223**, p. 473, 1877*. Für technische Zwecke sind grössere Maschinen dieser Art construirt worden, bei denen äquidistante Parallelreihen von Hufeisenmagneten von Stahl concentrisch mit ihren Polen nach innen um eine Axe herum geordnet sind, zwischen deren Polen eine Anzahl von Reihen von Spiralen hindurchrotiren, welche ebenfalls in mehreren äquidistanten Parallelreihen die Axe umgeben, so z. B. als eine der ersten die Maschine der Gesellschaft Alliance (vergl. du Moncel, Exposé des Applications de l'électricité, **1**, p. 360*) und die Maschine von Holmes (The practical Mechanics Journal, July 1858*). Die genauere Beschreibung gehört nicht hierher.

[1]) W. Siemens, Berl. Monatsber. 18. Nov. 1880*; Wied. Ann. **14**, p. 472, 1881*. — [2]) Pacinotti, Nuovo Cimento, **19**, p. 378, 1865*, [2] **12**, p. 140, 1874*.

die beiden mit Eisenfortsätzen versehenen Schenkel eines Elektromagnets, welche unten durch eine Eisenschiene mit einander verbunden sind.

Wird durch die Spiralen des Ringes mittelst der Contactrollen ein Strom geleitet, so erhält der Ring an der jedesmaligen Ein- und Austrittsstelle desselben einen Nord- und einen Südpol, welche durch die Anziehung der Pole des Elektromagnets zu ihnen hingezogen werden. Dadurch dreht sich der Ring, der Strom tritt durch andere Contactstellen

Fig. 124.

in seine Drahtrollen ein, sein Nord- und Südpol verschiebt sich zu denselben hin und so rotirt der Ring weiter. Wird umgekehrt der Ring gedreht, so werden in seinen Spiralen Ströme inducirt, welche durch die Contactrollen abgeleitet werden können und bei constanter Drehungsrichtung immer die gleiche Richtung bewahren.

Zu praktischer Verwerthung kam dieses Princip erst in der Maschine von Gramme[1]), von der wir hier nur die einfachste Form beschreiben. Vor den Polen NS eines hufeisenförmigen Magnets, Fig. 125, 126, rotirt um 441

Fig. 125.

[1]) Gramme, Compt. rend. 73, p. 175, 1871*; Dingl. Journ. 202, p. 239*; Compt. rend. 75, p. 1497, 1872*; Dingl. Journ. 207, p. 31*, 208, p. 166, 263,

eine gegen die Ebene seiner Schenkel senkrechte Axe ein Ring von Eisen (oder von Eisendrahtwindungen) *ABCD*, der auf seinem ganzen Umfange mit einzelnen, gleichgewundenen Drahtspiralen belegt ist, welche alle hinter einander zu einer fortlaufenden Windungsreihe verbunden sind. Von den Vereinigungsstellen der einzelnen Spiralen gehen zu der Axe des Ringes Metallfortsätze, $R_1 R_2$, die an derselben um 90° umgebogen und auf ihrer Oberfläche isolirt von einander und parallel neben einander befestigt sind. Zwei Federn oder Drahtbündel schleifen an zwei diametral einander gegenüberstehenden Stellen der so belegten Axe und vermitteln

Fig. 126.

die Fortleitung des in den Spiralen bei der Rotation des Ringes inducirten Stromes.

Durch Anwendung eines Jamin'schen Lamellenmagnets, Fig. 128, kann man die Wirksamkeit der Maschine bedeutend erhöhen.

Auch hier kann man den Stahlmagnet durch Elektromagnete ersetzen.

Beobachten wir zuerst nur die Rotation jeder einzelnen, auf den Eisenring geschobenen Spirale für sich, so ist das Potential der Pole *N*

1873*. Ein ähnlicher Apparat auch von Romilly, Compt. rend. **73**, p. 726, 1871*; Brevet d'invention, 3. März 1866*. Die obige Beschreibung nach Niaudet-Breguet, Chronique de l'industrie, Aout 1873, p. 233*; Dingl. Journ. **209**, p. 355, 1873*. Ueber die Theorie der Maschine vergleiche auch du Moncel, Compt. rend. **74**, p. 1335, 1872*. Gaugain, Compt. rend. **75**, p. 138, 627, 828, 1872*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **78**, p. 324, 1873*.

und *S*, Fig. 127, auf dieselbe gleich Null, wenn sie sich in *A* und *C* befindet, es ist im Maximum in *B* und *D*, aber an beiden Stellen von entgegengesetztem Vorzeichen. Rotirt also die Spirale von *B* durch *A* bis

Fig. 127.

D, so werden in ihr Ströme erzeugt, die z. B. in der Richtung *BAD* von ihrem einen Ende zum anderen fliessen; rotirt sie von *D* durch *C* nach *B*, so fliessen die Ströme in der entgegengesetzten Richtung *BCD*.

Fig. 128.

Bringt man also bei *B* und *D* vermittelst der auf den Metallstreifen *R* und R_1 schleifenden Leitungsdrähte *F* und *E* Ableitungen zu einem beliebigen Schliessungskreise an, so addiren sich diese beiden Ströme in

demselben. Jedesmal, wenn eine Spirale durch die Lagen B und D geht, sich die Stromesrichtung in ihr also umkehrt, tritt auch ein Wechsel in der Verbindung durch das Uebertreten von F und E auf die folgenden Metallstreifen R_2 und R_3 ein. Man erhält also gleichgerichtete, wenn auch bei dem Uebertritt von F und E auf R_2 und R_3 unterbrochene Ströme. Macht man die Enden von E und F so breit, dass sie gleichzeitig auf zwei auf einander folgenden Metallstreifen schleifen, so erhält man einen continuirlichen, und nur abwechselnd stärkeren und schwächeren Strom, dessen Schwankungen mit der Zahl der Spiralen und Ableitungsstreifen R abnehmen. — Wie die directe Induction in den Spiralen, verhält sich auch die indirecte Induction in denselben durch die bei der Rotation sich ändernde Magnetisirung des Eisenringes, der in jedem Moment aus zweien, in A und C sich mit ihren gleichnamigen Polen berührenden, halbkreisförmigen Magneten besteht, deren Polarität im Kreise fortschreitet. — Dabei können in Folge der Extraströme in den Spiralen Verschiebungen der Nullpunkte B und D in gleicher Weise eintreten, wie bei den übrigen Magnetelektrisirmaschinen (vergleiche die folgenden Paragraphen). Verwendet man statt eines Magnets NS deren mehrere, durch Zwischenräume von einander getrennte, deren Nordpole in einer Linie, deren Südpole in einer derselben parallelen Linie liegen, und lässt man zwischen je zweien Magneten einen Eisenring mit Spiralen und Ableitern rotiren, so kann man durch geeignete Verbindung die in den Spiralen der einzelnen Ringe inducirten Ströme hinter oder neben einander verbunden in einen Schliessungskreis eintreten lassen und so sehr starke Wirkungen erzielen.

442 In neuerer Zeit hat man bei den magnetelektrischen Maschinen, namentlich für technische Zwecke, z. B. zur Erzeugung des elektrischen Lichtes, für galvanoplastische Zwecke u. s. f., in doppelter Weise eine stärkere Wirkung erzielt.

Einmal hat man die durch eine Magnetelektrisirmaschine (von ähnlicher Construction wie die von Siemens angegebene) erzeugten Inductionsströme durch einen Commutator in gleicher Richtung um einen Elektromagnet geleitet, wodurch letzterer einen starken Magnetismus annahm, und zwischen den Polen desselben einen mit einer Spirale umwundenen Anker rotiren lassen, dessen Inductionsströme viel kräftiger sind, als die durch die Stahlmagnete direct inducirten Ströme.

Man könnte selbstverständlich diese letzteren Inductionsströme zur Erzeugung eines dritten Elektromagnetes verwenden, der in einem, seinen Anker umgebenden Drahtgewinde wiederum Inductionsströme erzeugte u. s. f. Der Gedanke zu dieser Verstärkung ist schon vollkommen klar von Sinsteden[1]) im Jahre 1851 ausgesprochen worden.

---

[1]) Sinsteden, Pogg. Ann. 84, p. 186, 1851*.

Dieses System ist zuerst bei einer Maschine von Wilde[1]) benutzt worden. Auch bei den Maschinen von W. Siemens für Wechselströme und denen von von Hefner-Alteneck[2]) für continuirliche Ströme kommt es zur Verwendung, bei welchen zwischen einem System von $2 \times n$ an Eisenringen befestigten Elektromagneten, deren je zwei mit ihren entgegengesetzten Polen einander gegenüber stehen und die auch im Kreise herum abwechselnde Polarität besitzen, der Strom einer kleinen Siemens'schen dynamoelektrischen Maschine geleitet wird. Die gegenüberstehenden Pole derselben sind plattenförmig erweitert. Bei der Maschine für Wechselströme rotirt zwischen den beiden Systemen von Elektromagneten ein System von n flachen Spiralen, welche der Abkühlung wegen auf durchbrochene Spulen aufgewickelt sind. Durch Metallringe auf der Axe werden die in ihnen inducirten, entsprechend der Annäherung und Entfernung von den Polen der festen Magnete abwechselnd gerichteten Ströme weiter geleitet. Damit sich hierbei die in den auf einander folgenden Spiralen inducirten Ströme addiren, müssen sie abwechselnd entgegengesetzt verbunden werden. Die Maximalinduction findet in allen Spiralen in demselben Moment statt, so dass die alternirenden Ströme durch Momente von Stromlosigkeit unterbrochen sind.

Für den continuirlichen Strom ist die Zahl der rotirenden Spiralen (8) kleiner, als die der Elektromagnete (10), zwischen denen sie hindurchgehen, so dass immer nur in zwei diametral einander gegenüberstehenden Spiralen die Induction im Maximum ist. Sämmtliche Spiralen sind in abwechselnder Lage mit einander zu einem in sich geschlossenen Kreise verbunden. Die Verbindungsstellen communiciren mit acht auf die Axe aufgesetzten Metallringen, welche mit einem auf dieselbe Axe aufgesetzten Commutator in der Weise verbunden sind, dass durch sie die Ströme in gleicher Richtung zu Metallfedern gelangen, welche auf denselben schleifen.

Von viel grösserer Wichtigkeit ist das zweite, fast gleichzeitig von Werner Siemens[3]), Wheatstone[4]) und Anderen[5]) zur Anwendung ge- **443**

---

[1]) Wilde, Phil. Trans. 1867, p. 89*; Phil. Mag. [4] **34**, p. 81, 1867*; Carl's Repert. **3**, p. 186, 1867*. — [2]) von Hefner-Alteneck, Elektrotechn. Zeitschr. **2**, p. 162, 1881*. Ein näheres Eingehen auf die Construction der einzelnen magnetelektrischen Maschinen und ihre Leistungen liegt ganz ausserhalb des Gebietes dieses Werkes. Wir erwähnen deshalb nur kurz einige der charakteristischsten und historisch oder principiell interessantesten Formen der Maschinen, ohne uns mit den mannigfachen Abänderungen derselben zu beschäftigen. Wir glauben dies um so eher thun zu können, als eine nähere Beschreibung derselben in den in neuerer Zeit in nicht geringer Anzahl erschienenen technischen Specialwerken zu finden ist. — [3]) Werner Siemens, Monatsber. der Berl. Akad. 17. Jan. 1867*; Proc. Roy. Soc. 14. Febr. 1867*; Pogg. Ann. **130**, p. 332, 1867*; Carl's Repert. **3**, p. 179*. — [4]) Wheatstone, Proc. Roy. Soc. 14. Februar 1867*; Carl's Repert. **3**, p. 190*; Arch. Nouv. Ser. **29**, p. 70*. — [5]) Murray, Engineer 1866, Juli 20*; und auch Varley, Patent 1866, Dec. 24*; vergl. Phil. Mag. [4] **45**, p. 439, 1873*. Ebendaselbst die Beschreibung einer

brachte Princip, nach welchem man vor einem Elektromagnet einen Anker mit Drahtspirale rotiren lässt, die in letzterer erzeugten Inductionsströme durch einen Commutator gleich richtet und sie nun in einer solchen Richtung um den Elektromagnet selbst leitet, dass dadurch seine Polarität verstärkt wird. Besitzt hierbei das Eisen des Elektromagnets von vornherein einen schwachen Magnetismus, den man etwa durch Berühren mit Stahlmagneten, einmaliges Herumleiten eines constanten Stromes u. s. f. hervorbringeu kann, so wird derselbe beim Rotiren des Ankers auch ohne Mitwirkung äusserer magnetisirender Kräfte durch die Inductionsströme des mit seiner Spirale versehenen, rotirenden Ankers stärker magnetisirt. Indem sich so wiederum seine inducirende Wirkung steigert, wächst allmählich sein Moment und die Stärke der Inductionsströme bis zum Maximum an. Man nennt die derartig construirten Maschinen dynamoelektrische Maschinen.

Wir beschreiben hier nur kurz zwei Hauptformen dieser Maschinen.

444 In den dynamoelektrischen Maschinen von Siemens liegen zwei hufeisenförmige Elektromagnete, Fig. 129, zu beiden Seiten eines rotirenden Inductors mit ihren gleichnamigen Polen einander gegenüber. Sie sind

Fig. 129.

durch eine Anzahl kreisbogenförmig gebogener Eisenlamellen mit einander verbunden, welche mithin die eigentlichen Pole darstellen und den zuerst im Jahre 1872 von von Hefner-Alteneck construirten Cylinder-

grösseren Maschine von Wilde; auch Carl's Repert. 9, p. 242*. Eine der ersten nach diesem Princip construirten Maschinen von Ladd siehe Phil. Mag. [4] 33, p. 544, 1867*; Carl's Rep. 3, p. 231 u. 376, 1867*.

inductor umfassen. Derselbe besteht aus einem Cylinder von Eisendrähten, um welchen der Länge nach Drahtwindungen gelegt sind, deren Enden je mit zwei diametral gegenüber stehenden longitudinalen, auf der Axe isolirt befestigten Messingstreifen verbunden sind, gegen welche zwei um 180° von einander entfernte breite Federn schleifen. Da hierbei in je zwei diametral gegenüber liegenden Drähten des Inductors entgegengesetzt (z. B. von vorn nach hinten und von hinten nach vorn) gerichtete Ströme inducirt werden, addiren sie sich in denselben, wenn sie zu einer Windung vereint sind, und so durchfliessen alle Inductionsströme die zwischen den Schleiffedern eingeschaltete Leitung in derselben Richtung und zwar, wenn auch nicht immer in ganz gleicher Intensität, so doch mit nur kleinen Schwankungen derselben. In diese Leitung werden zugleich die Drahtwindungen der Elektromagnete eingeschaltet.

Je nachdem man grössere oder geringere äussere Widerstände zu überwinden hat, werden viele Windungen von relativ dünnerem Draht oder wenigere von dickerem Draht, auch, z. B. für galvanoplastische Zwecke, Windungen von dicken Kupferstäben von rechteckigem Querschnitt über dem Elektromagnet verwendet[1]).

Fig. 130.

[1]) Die specielle Beschreibung der sehr sinnreichen Anordnung der Windungen und ihrer Verbindung mit den Metalleinlagen des Conductors gehört nicht hierher. Abgeänderte Formen dieser dynamoelektrischen Maschinen u. A. von Edison, bei

445 Ebenso wird bei der Gramme'schen Maschine das dynamoelektrische Princip verwendet. Fig. 130 giebt ein Bild derselben. Die Elektromagnete liegen horizontal; ihre Polarität ist in der Uebersichtsfigur 131

Fig. 131.

angegeben [1]), in der zugleich die Zuführung des Stromes zu denselben durch die Schleiffedern p und p_1 angedeutet ist [2]).

---

welchen ein etwas abgeänderter Siemens'scher Cylinderinductor zwischen den halbcylindrisch ausgehöhlten Halbankern eines mit seinen Schenkeln nach unten gestellten grossen Elektromagnets rotirt und nur ein Theil des Inductionsstromes um den Magnet geleitet wird. — Dasselbe Princip wird auch bei der Maschine von Lontin (Mondes, 36, p. 529, 37, p. 68, 1875*) benutzt, bei welcher eine Anzahl mit Spiralen umwundener Eisenkerne, wie die Speichen eines Rades, an einer horizontalen Axe befestigt ist und sich zwischen den Polen eines Elektromagnets mit verticalen Schenkeln dreht. Die, je nachdem man continuirliche oder Wechselströme erzeugen will, in gleichem oder abwechselnd entgegengesetztem Sinne gestellten Spiralen sind wie beim Gramme'schen Ring alle hinter einander verbunden und die Verbindungsstellen mit dem Commutator u. s. f.

1) Eine directe Untersuchung der Induction im Pacinotti-Gramme'schen Ring durch Drehung einer kleinen, auf einem Holz- oder Eisenring befestigten Spirale zwischen Magnetpolen von Isenbeck, s. Elektrotechn. Zeitschr. 4, p. 337, 361, 1883*; Beibl. 7, p. 921. — 2) Aehnlich ist die Maschine von Schuckert, bei welcher der Eisenkern des Ringes aus von einander isolirten Blechscheiben besteht und die Magnetpole über beide Seitenflächen des Ringes übergreifen, so dass die dort befindlichen, radial verlaufenden Drahttheile des Ringes der inducirenden Wirkung besser ausgesetzt sind, als bei der Gramme'schen Maschine. — Auch bei der Maschine von Brush ist der Gramme'sche, zwischen den breiten Polen zweier horizontal liegender Hufeisenelektromagnete rotirende Ring benutzt, bei welchem indess die auf einem Eisenkern aufgewundenen Spiralen durch keilförmige in der Richtung der Peripherie mehrfach durchschnittene Verstärkungen des Eisenringes getrennt sind. Durch den Commutator wird abwechselnd ein Windungspaar nach dem andern während $1/8$ Umdrehung ausgeschaltet, um die zu starke Erhitzung zu vermeiden. Die Maschinen liefern Elektricität von sehr hohen Spannungen. — Bei der Maschine von Bürgin sind an Stelle eines Ringes deren acht neben einander verwendet, von denen ein jeder aus einem aus Eisendraht gewundenen Sechseck besteht, dessen einzelne Seiten mit Draht umwickelt sind und welches an sechsarmigen, auf einer Axe aufgesetzten sternförmigen Trägern befestigt ist. Die Sechsecke sind je um $7\frac{1}{2}^0$ gegen einander gedreht, so dass eins nach dem andern in die Lage der Maximalinduction kommt. — Bei der Maschine von Jürgensen und Lorenz wird auch

Die Intensität der durch die Magnetelektrisirmaschinen und elektrodynamischen Maschinen inducirten Ströme ist ausser von den unveränderlichen Constructionsbedingungen einer jeden, abhängig von der Geschwindigkeit der Drehung des Ankers, von dem Widerstand der Leitung, von der Stellung des Commutators. Wir wollen diese Bedingungen einzeln betrachten und dabei zuerst die inducirenden Magnete als unveränderlich ansehen. 446

1) Einfluss der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers. Da die Anzahl der Polaritätswechsel des Ankers proportional mit der Drehungsgeschwindigkeit zunimmt, so müsste die in der Inductionsspirale in gleichen Zeiten inducirte Stromintensität der Drehungsgeschwindigkeit direct proportional sein. Dem ist aber nicht so, wie W. Weber[1]) zunächst durch einen einfacheren Apparat nachwies. Ein Eisenstab von 71 mm Länge und 29 mm Durchmesser wurde diametral durch eine kugelförmige Holzbüchse gesteckt, und dieselbe in einer gegen den Eisenstab äquatorial gelegenen Rinne mit Draht umwunden. Die Kugel mit dem Stabe konnte vermittelst einer Zahnradverbindung um eine in der Aequatorialebene liegende, horizontale und auf dem Eisenstab senkrechte Axe gedreht werden. Auf die Axe war ein der Länge nach durchschnittener Metallcylinder geschoben, dessen beide Hälften mit den Enden des Drahtes in der Rinne verbunden waren. Federn, welche gegen den Cylinder schleiften, führten zu einem Multiplicator, dessen Windungen in ostwestlicher Richtung einen in gleicher Richtung bifilar aufgehängten Magnetstab umgaben. — Der Eisenstab mit der Holzbüchse wurde unter Einfluss des Erdmagnetismus einmal für sich in Rotation versetzt, und sodann, indem sich vor beiden Seiten desselben zwei Magnetstäbe in grösserem oder geringerem Abstande befanden. Vermittelst der Spiegelablesung wurde die Ablenkung des bifilar aufgehängten Magnetstabes bestimmt, welche der Intensität der erzeugten Inductionsströme entspricht.

Der Metallcylinder auf der Rotationsaxe war so gestellt, dass bei jedem Wechsel der Richtung der Inductionsströme die Federn auf die entgegengesetzten Hälften desselben übertraten, und so im Multiplicator die Stromesrichtung constant blieb. Bezeichnet man die Intensität des bei einer halben Umdrehung des Eisenstabes (bei einem Wechsel seiner Polarität) inducirten Stromes nach Abzug des durch die Drehung der Holzbüchse ohne Eisenstab inducirten Stromes bei einer gegebenen Drehungsgeschwindigkeit mit I, so betrug dieselbe bei doppelter Drehungsgeschwindigkeit weniger, nämlich:

---

noch innerhalb des zwischen den Magneten rotirenden cylindrischen Gramme'schen Ringes ein fester Elektromagnet angebracht und dadurch die Wirkung verstärkt. — Auf andere Abänderungen dieser Maschinen einzugehen, liegt nicht im Plane dieses Werkes.

[1]) W. Weber, Resultate des magn. Vereins 1838, p. 118*.

Magnetisirung		Wechsel der Polarität in der Secunde	
		20	40
durch die 457,5 mm entfernten Magnetstäbe . .		$I = 1$	0,89
durch die 58,5 mm entfernten Magnetstäbe . .		$I = 1$	0,765

Dasselbe Verhalten zeigte sich auch an einer grösseren Stöhrer'schen Magnetelektrisirmaschine mit drei verticalen Hufeisenmagneten. Als W. Weber[1]) bei dieser die Drehungsgeschwindigkeit der Anker vermehrte und durch Einstellung des Commutators alle Inductionsströme in gleicher Richtung durch eine Drahtrolle leitete, welche östlich oder westlich von dem Halbirungspunkt der Axe des Magnetes eines Spiegelmagnetometers aufgestellt war, so ergab sich die Ablenkung des Magnetes:

Zahl der Wechsel n in der Secunde	27,90	33,48	44,64
Ablenkung i	89,15	95,26	101,645

Aus diesen Beobachtungen folgt

$$i = \frac{5,74435\,n}{1 + 0,01939\,n + 0,00033\,n^2}$$

so dass sich bei einer Anzahl von 55 Wechseln ein Maximum von $i = 103,1$ ergeben müsste. — Dasselbe Resultat beobachtete Lenz[2]) bei Einschaltung eines Voltameters oder Galvanometers in den Schliessungskreis der Spiralen eines Stöhrer'schen Apparates mit drei Magneten.

2) Einfluss des Widerstandes der Leitung. Verbindet man die Inductionsspiralen der Anker hinter oder neben einander oder schaltet in ihren Schliessungskreis ausserhalb verschiedene Widerstände ein, so bemerkt man zunächst bei ungeänderter Stellung des Commutators eine Zunahme der elektromotorischen Kraft der inducirten Ströme mit der Zunahme des Widerstandes. Die elektromotorische Kraft einer Magnetelektrisirmaschine ist daher nicht ohne Weiteres mit der einer gewöhnlichen galvanischen Säule zu vergleichen[3]).

3) Einfluss der Stellung des Commutators. Sucht man durch den Commutator die Richtung aller Inductionsströme beim Annähern und Entfernen des Ankers von den Magnetpolen gleich zu machen und misst ihre Intensität an einem Galvanometer, so steigt die letztere, wenn man den Commutator so verschiebt, dass er erst einige Zeit nach dem Vorbeigang des Ankers vor den Magnetpolen die Verbindung der Inductionsrollen mit der Leitung wechselt. Diese Verstellung des Commutators entgegen dem Sinne der Rotation des Ankers muss bei wachsender Drehungsgeschwindigkeit desselben immer grösser sein, um jedesmal das Maximum der Stromintensität zu erhalten. — So musste z. B. Lenz[4]), wie die folgende Tabelle zeigt, den Commutator seines

---

[1]) W. Weber, Pogg. Ann. 61, p. 431, 1844*. — [2]) Lenz, Pogg. Ann. 76, p. 494, 1849*. — [3]) Jacobi, Bullet. de St. Petersb. 5, p. 97*; Pogg. Ann. 69, p. 198, 1846*; vergl. auch Lenz, l. c. und Pogg. Ann. 92, p. 128, 1854*. — [4]) Lenz, Pogg. Ann. 76, p. 519, 1849*.

Inductionsapparates um t^0 verschieben, um bei der Umdrehungszahl n des Ankers in der Minute das Maximum i der Stromintensität zu erhalten; während bei der Nullstellung des Commutators, in welcher er gerade beim Vorbeigang des Ankers vor den Magnetpolen die Stromesrichtung wechselte, die Intensität sich gleich i_0 ergab:

n	140	270	413	528	644
t	9^0	12^0	12^0	12^0	15^0
i	9,17	21,12	27,22	30,46	32,85
i_0	8,41	19,73	24,81	26,71	28,71

Hiernach nimmt selbst bei richtiger Einstellung des Commutators die elektromotorische Kraft der inducirten Ströme nicht proportional der Drehungsgeschwindigkeit zu, sondern nähert sich allmählich einem Maximum, welches um so schneller erreicht wird, je geringer der Widerstand des Schliessungskreises, also je grösser die Stromintensität in demselben ist. — Dieses Resultat hat auch Koosen [1]) durch mehrfache Versuche bestätigt.

Die richtige Einstellung des Commutators ist besonders zu beachten, wenn man durch die inducirten Ströme eine constante Ablenkung der Magnetnadel oder eine starke Wasserzersetzung erhalten will, da bei falscher Stellung die beiden Gase zum Theil an derselben Elektrode erscheinen und sich wieder vereinen. Ebenso wird bei der Elektrolyse von Kupfervitriollösung u. s. f. (zu Zwecken der Galvanoplastik) in diesem Falle das an der einen Elektrode abgeschiedene Kupfer zum Theil durch den nachher daselbst ausgeschiedenen Sauerstoff oxydirt und dadurch brüchig [2]). — Auch wenn man Wärmeerscheinungen durch den, stets in gleicher Richtung fortgeleiteten Inductionsstrom hervorbringen will, ist die Stellung des Commutators nicht zu vernachlässigen, da, wenn der Strom unterbrochen wird, während er nicht Null ist, ein Theil seiner Wirksamkeit verloren geht.

447 Der Grund dieser Erscheinungen kann nach den Erfahrungen des vorigen Capitels ein doppelter sein: einmal, wie unter Anderen Sinsteden [3]) meinte, dass die Eisencylinder der Anker eine gewisse Zeit brauchten, um ihren Magnetismus zu wechseln, so dass, wenn z. B. der Commutator die Stromverbindung in dem Moment umkehrt, in welchem der Anker bei dem Magnetpol vorbeigeht, also die Annäherung in eine Entfernung, das Anwachsen des Magnetismus in eine Abnahme, die Richtung des Inductionsstromes in die entgegengesetzte übergehen sollte, der Anker noch nicht das Maximum des Magnetismus angenommen hätte, sondern dies erst einige Zeit nachher einträte, wenn derselbe sich schon wieder von dem Pol entfernt hätte. Da indess die Anker hier sehr dicht

[1]) Koosen, Pogg. Ann. 87, p. 386, 1852*. — [2]) Jacobi, Bullet. de St. Petersb. 5, p. 318, 1846*. — [3]) Sinsteden, Pogg. Ann. 84, p. 181 u. flgde. 1851*.

an den magnetisirenden Polen sich befinden, so ist die zu ihrer Magnetisirung erforderliche Zeit nach den Versuchen von Beetz (vergl. §. 319) jedenfalls sehr klein. Auch würde, wenn dies der überwiegende Grund der betrachteten Erscheinungen wäre, eine Aenderung des Widerstandes der Schliessung der Inductionsrollen keinen Einfluss auf die inducirte elektromotorische Kraft ausüben.

448 Der Hauptgrund der Erscheinungen beruht, wie von Lenz (l. c.) richtig erkannt worden ist, in der Rückwirkung der in den Spiralen inducirten Ströme auf den Magnetismus der Eisenkerne, welche somit nicht den ganzen Magnetismus erhalten, den sie in jeder Lage annehmen würden, wenn sie sich im Ruhezustande befänden.

Wir wollen zunächst durch eine graphische Darstellung, wie sie zuerst Lenz (l. c.), dann Koosen gegeben, den Gang des Phänomens verfolgen. Die Ordinaten der Curve $ABCDE$ (Fig. 132) bezeichnen

Fig. 132.

die Magnetismen y, welche der bei den Polen des Magnetes vorbei rotirende Anker an jeder Stelle seiner Bahn wirklich annimmt, die durch die Abscissenaxe $AB_1\,C_2\,CD_1\,E_2E$ dargestellt wird. Die Lage der Pole selbst lassen wir noch unbestimmt. Die Curve $A_1B_1\,C_1\,D_1\,E_1$, deren Ordinaten am grössten an den Stellen sind, an welchen die Curve $ABCDE$ am steilsten ansteigt oder abfällt, möge den Gang der Intensitäten der bei der Drehung des Ankers inducirten Ströme und zugleich die Stärke des ihnen proportionalen, durch sie im Anker erzeugten Magnetismus $-am.dy/dt$ anzeigen. — Addiren wir die Ordinaten beider Curven, indem wir die Ordinaten der Curve $A_1B_1\,C_1\,D_1\,E_1$ umgekehrt nehmen, so stellt die diesen Summen entsprechende Curve $A_2\,B_2\,C_2\,D_2\,E_2\,F_2$ den Magnetismus M des Ankers dar, welchen er annähme, wenn er an jeder Stelle in Ruhe verweilte. — Die grössten Ordinaten bB_2 und dD_2 bezeichnen den Magnetismus des Ankers, während er gerade vor den Magnetpolen ruht, die Punkte C_2 und E_2 seine gegen diese Stellungen um 90° gedrehten Lagen. Es ist unmittelbar aus der Figur ersichtlich, dass die Maxima BB_1 und DD_1 des Magnetismus y bei der Drehung des Ankers kleiner sind, als die Maxima in der Ruhelage B_2b und D_2d, und dass diese Maxima von y im Verhältniss zu denen von M um so

kleiner werden, je grösser die Ordinaten der Curve $A_1 B_1 C_1 D_1 E_1$ sind, je grösser also die Intensität der inducirten Ströme ist. Dies letztere tritt ein, einmal bei einem geringeren Widerstand der Schliessung, sodann auch bei einer schnelleren Drehung des Ankers, da hierbei die in der Zeiteinheit in den Inductionsspiralen inducirte elektromotorische Kraft $a dy/dt$ grösser ist.

Ferner sind die Maxima des Magnetismus bei der Drehung des Ankers im Sinne dieser Drehung selbst von bB_2 nach BB_1 und von dD_2 nach DD_1 verschoben. Die Intensität der inducirten Ströme ist also nicht Null, wenn die Anker in b und d den Magnetpolen gerade gegenüberstehen, sondern wenn sie um ebensoviel entfernt davon sind, als die Verschiebung der Maxima beträgt; und in denselben Zeiten kehrt sich die Richtung der Inductionsströme um. Wollen wir daher durch den Commutator die Stromesrichtung aller inducirten Ströme gleich machen, so muss er in den Stellungen B_1 und D_1 des Ankers die Verbindung umkehren. — Geschieht die Umkehrung bei anderen Stellungen, so geht einmal der Theil des inducirten Stromes verloren, welcher beim Uebergang der Federn über die nicht leitenden Theile des Commutators inducirt wird, und bei diesem Uebergang zeigen sich in Folge der Oeffnung des inducirten Kreises lebhafte Funken, welche in der richtigen Stellung des Commutators nicht auftreten. Sodann hat auch nicht der ganze, durch den Schliessungskreis geleitete Inductionsstrom gleiche Richtung, wie dies an der Entwickelung gemischter Gase in einem in denselben eingefügten Voltameter zu bemerken ist.

Mit wachsender Drehungsgeschwindigkeit wird der Abstand der Maxima bB_2 und BB_1, dD_2 und DD_1 immer grösser, und ebenso muss man den Commutator immer weiter herumdrehen, um rechtzeitig die Stromesrichtung zu wechseln.

Ausser den in den Spiralen inducirten Strömen wirken in ganz gleicher Weise die in der Masse der Eisenkerne selbst inducirten Ströme, welche indess bei Anwendung von Eisendrahtbündeln zu vermeiden sind.

449 Die Berechnung ergiebt sich unmittelbar aus den Formeln des §. 121 [1]).

Ist E die elektromotorische Kraft, welche in dem Schliessungskreise der Maschine wirkt, P das Potential der Inductionsspirale auf sich selbst (mit Einschluss der Inductionswirkung des Eisenankers), R der Widerstand der Schliessung, i die Intensität des Stromes in jedem Moment, so ist die gesammte Arbeitsleistung in der Zeit dt gleich $Eidt$. Dieselbe setzt sich aus der bei der Erwärmung des Schliessungskreises ver-

---

[1]) Die Berechnung ist zuerst von Koosen durchgeführt. Wir folgen einer Darstellung von Joubert, welche sich den Formeln des §. 121 bequemer anschliesst. Vergl. Ann. de l'école normale 10, p. 131, 1881*; Beibl. 5, p. 214*.

brauchten Arbeit $i^2 R dt$ und der zur Steigerung der Stromintensität verwendeten $Pi . di/dt . dt$ zusammen, so dass bei Division durch i und dt

$$E = iR + P\frac{di}{dt} \quad \dots \dots \dots \quad 1)$$

wird. Nimmt man an, wie es auch oft annähernd mit den Versuchen übereinstimmt, dass sich E entsprechend einer Sinuscurve ändert, und ist T die Umlaufszeit des Ankers, so kann man $E = E_0 \sin 2\pi t / T$ setzen.

Setzt man

$$tg\, 2\pi\varphi = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{P}{R} \quad \dots \dots \dots \quad 2)$$

und zählt die Zeit von einem Moment an, so dass $i = 0$ für $t = \varphi T$ wird, so erhält mah als Integral der Gleichung

$$i = \frac{E_0 T}{(R^2 T^2 + 4\pi^2 P^2)^{1/2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \varphi\right) \quad \dots \quad 3)$$

Die Intensität entspricht also auch noch einer Sinuscurve.

Die mittlere Intensität ist

$$I = \frac{2 E_0 T}{\pi (R^2 T^2 + 4\pi^2 P^2)^{1/2}}.$$

Ist $4\pi^2 P^2$ klein gegen $R^2 T^2$, so folgt die Intensität nahezu dem Ohm'schen Gesetz.

Die Phase der Bewegung ist durch die Gleichung $tg\, 2\pi\varphi = 2\pi P / TR$ bestimmt. Ist $R = \infty$, also der Schliessungskreis offen, so ist $\varphi = 0$, d. h. es findet keine Verschiebung des Nullpunktes statt; nimmt R ab, so wächst die Verschiebung desselben. Ebenso wächst φ bei constantem R mit wachsender Drehungsgeschwindigkeit ($n = 1/T$) und wird für $n = \infty$ gleich $1/4$.

Die Arbeit der Maschine ist im Maximum, wenn $I^2 R$ ein Maximum ist, woraus folgt $R = 2\pi P / T$ und $tg\, 2\pi\varphi = 1$ oder $\varphi = 1/8$.

In diesem Falle ist also die Verschiebung des Nullpunktes der vierte Theil des Abstandes der beiden Magnetpole. Zugleich wird

$$i = \frac{E_0}{\pi R}.$$

Es gilt also das Ohm'sche Gesetz vollständig.

Das Maximum E_0 der elektromotorischen Kraft während eines Umlaufs ist proportional der Geschwindigkeit, wenn nur ein Paar von Magnetpolen resp. ein Stromwechsel vorhanden ist [1]). Sind deren m, so wird das Maximum der elektromotorischen Kraft

$$E_m = \frac{E_0}{mT}$$

[1]) Was auch verschiedene Versuche ergaben.

und die mittlere Intensität

$$I_m = \frac{2 E_0}{m \pi (R^2 T^2 + 4 \pi^2 P^2)^{1/2}}.$$

Wächst die Geschwindigkeit, so nähert sich I_m einer Grenze

$$I_m = \frac{E_0}{m \pi^2 P};$$

I wird also nicht bis ins Unendliche gesteigert.

450 Die Richtigkeit der gegebenen Erklärungen kann man prüfen, indem man sowohl den Magnetismus M des Ankers bei verschiedener Stellung, als auch die Intensität der inducirten Ströme nur während einer kurzen Zeit misst, wenn der Anker durch diese Stellung hindurchgeht. Dies ist zuerst von Lenz[1]) durchgeführt worden. Er bediente sich dabei einer Stöhrer'schen Maschine mit drei aufrechten Magneten (Fig. 122). Die Fortleitung der Inductionsströme geschah durch einen besonderen Commutator. Derselbe bestand aus zwei auf einer Holzscheibe befestigten und mit ihr auf die Drehungsaxe aufgeschraubten Eisenscheiben, von denen die eine mit dem einen, die andere mit dem anderen Ende des um die drei Anker hinter einander gewundenen Drahtes verbunden war. Der Rand der einen Scheibe war nicht durchbrochen. Der Rand der anderen war so ausgefeilt, dass nur in Abständen von 60^0 sechs je 3^0 breite Streifen von Eisen stehen blieben, zwischen denen sodann der Rand wieder mit einer nichtleitenden Masse ausgefüllt war. Gegen beide Eisenscheiben schleiften Federn, welche mit der übrigen Leitung verbunden waren. Die durchbrochene Scheibe trug eine Theilung und die Drehungsaxe einen Zeiger, so dass man die Sectoren jener Scheibe so stellen konnte, dass die auf derselben schleifende Feder die Stromverbindung in den Momenten herstellte, in welchen der Anker sich auf einer beliebigen Stelle des Weges zwischen den zwei Polen eines der drei Magnete befand.

Da die Richtung der auf diese Weise bei gleichförmiger Rotation der Anker erhaltenen partiellen Inductionsströme wechselte, so wurde ihre Intensität durch ein Elektrodynamometer bestimmt.

Bei anderen späteren Versuchen[2]) wurde der Commutator in der Weise abgeändert, dass nur die gleichgerichteten Ströme in gewissen entsprechenden Zeittheilen durch ihn hindurchgehen konnten. Er bestand aus zwei mit den Enden des Inductionsdrahtes verbundenen, auf die Drehungsaxe der Anker isolirt aufgesetzten Eisenringen, deren jeder drei Ausschnitte hatte, und welche sowohl zusammen, als auch gegen einander gedreht werden konnten, so dass die dagegen schleifenden Federn nur dann den Strom fortleiten konnten, wenn sie gleichzeitig das Eisen

---

[1]) Lenz, Pogg. Ann. **92**, p. 128, 1854*. — [2]) Lenz, Bullét. de St. Petersb. **16**, p. 177, 1857*.

beider Ringe berührten. Erst wurde die gegenseitige Stellung der Ringe bestimmt, bei der bei Verbindung der Federn mit einer galvanischen Säule und Einschaltung eines Galvanometers in den Schliessungskreis gerade noch kein Strom durch den Commutator hindurchging, und dann wurde die eine Scheibe rückwärts um 6° gedreht, so dass die Breite des leitenden Streifens, auf dem die Federn die Leitung vermittelten, 6° betrug. Da die Ströme alle gleichgerichtet waren, so konnte die Stromintensität durch eine Nervander'sche Tangentenbussole abgelesen werden.

Bei beiden Versuchsreihen ergab sich für die Intensität der Inductionsströme in verschiedenen Phasen der Bewegung des Ankers nahezu dieselbe Gesetzmässigkeit. Bezeichnen die Abscissen der Curve dy auf AE (Fig. 133) den Abstand eines der Anker von einem Magnetpol in Graden, so ergeben die Ordinaten von dy die dieser Stellung bei einer gewissen Drehungsgeschwindigkeit entsprechende Intensität der inducirten Ströme bei den zuletzt erwähnten Versuchen. Unmittelbar bei dem Vorbeigang des Ankers vor dem Pole ist also die Stromesrichtung negativ, sie ist Null bei einer Drehung desselben um 10,5° und erreicht ein grösseres Maximum bei 23,4°, ein kleineres bei 44,4°, zwischen beiden den kleinsten Werth bei 35,4°.

Fig. 133.

Die Curve dy weicht von der Figur 132 gezeichneten wesentlich ab, bei der ganz willkürlich der Gang der Magnetisirung y der Anker angenommen wurde. Construirt man aus der Curve dy die Curve y, in welcher die Differenzen je zweier benachbarter Ordinaten den Ordinaten der Curve dy an derselben Stelle proportional sind, so stellt diese die bei der Drehung des Ankers wirklich auftretenden Magnetismen derselben dar. — Die Addition der Ordinaten von dy zu Linien, welche den Ordinaten von y proportional sind, ergiebt die Curve der Magnetismen M des Ankers, während er in verschiedenen Lagen vor den Magnetpolen ruht. Das doppelte Maximum von dy ist also nur durch die Gestalt der Magnetisirungscurve bedingt. Bei gleich starker Magnetisirung der beiden Pole des Stahlmagnetes muss indess die gesammte elektromotorische Kraft, welche durch die Abnahme der durch den einen Pol erzeugten Polarisirung des Ankers erzeugt wird, unter allen Umständen gleich sein der elektromotorischen Kraft, welche bei der Zunahme der Magnetisirung des Ankers durch den anderen Pol hervorgerufen ist. Eine Ausmessung der diesen elektromotorischen Kräften

entsprechenden Flächenräume $\alpha\beta\gamma\delta$ und $\gamma\delta\varepsilon\alpha$ ergiebt auch diese Gleichheit wenigstens annähernd. (Sie verhalten sich wie 1591 : 1675.)

Nimmt man den leitenden Streifen des Commutators breiter, so sollte man die Summe aller Ströme erhalten, welche inducirt werden, während durch den Streifen die Bahn der Inductionsströme geschlossen wird. Da sich indess beim ersten Hinaufgleiten der die Leitung vermittelnden Feder auf denselben der Schliessungsextrastrom von den hindurchfliessenden Inductionsströmen subtrahirt, so erscheinen dieselben mit wachsender Breite des Streifens etwas grösser, als man nach letzterer allein erwarten sollte. Der beim Abgleiten der Feder vom Streifen inducirte Oeffnungsextrastrom compensirt hierbei den Schliessungsstrom nicht ganz, da er sich nicht vollständig entwickeln kann.

Wollte man nach allen diesen Angaben die Leistungen einer Magnetelektrisirmaschine mit denen einer Hydrosäule vergleichen, so müsste dies unter ganz bestimmten Bedingungen geschehen, nachdem man z. B. genau den Widerstand des Schliessungskreises der Maschine, die Stellung ihres Commutators, die Umdrehungsgeschwindigkeit ihres Ankers u. s. f. festgestellt hat. Erst dann kann man die Vergleichung vornehmen, indem man z. B. den Strom der Magnetelektrisirmaschine durch den einer Hydrosäule compensirt, dafür aber einen dem Widerstand der letzteren gleichen Widerstand aus dem Schliessungskreise der ersteren ausschaltet.

Aehnliche Versuche hat Joubert[1]) an einer Siemens'schen Maschine mit alternirenden Strömen angestellt. 451

Um die Stärke des Magnetfeldes der Maschinen zu bestimmen, wurde darin eine kleine, mit dem Galvanometer verbundene Spirale um eine auf den Kraftlinien senkrechte Axe von 180° gedreht. Die Reduction auf absolutes Maass geschah durch Drehung derselben Spirale im Felde eines Ruhmkorff'schen Magnets, in welchem die Drehung der Polarisationsebene in einem 10 cm langen Rohr voll Schwefelkohlenstoff beobachtet wurde. Obige Stärke wurde durch eine nach Potenzen der Stromintensität fortschreitende Formel wiedergegeben. Bei der Drehung der Inductionsspirale um je 36° wurde jedesmal die inducirte elektromotorische Kraft bestimmt. Danach entsprach dieselbe einer Sinusoide.

Während die Maschine in Bewegung war, wurde zwischen zwei Punkten p und p_1 der Hauptleitung von einer bestimmten Potentialdifferenz eine Nebenschliessung von sehr grossem Widerstand angebracht, und zwischen dem einen Punkt p der Hauptleitung und einem veränderlichen Punkt p_2 der Nebenleitung eine Daniell'sche Säule von 1 bis 5 Elementen, ein Galvanometer und ein Interruptor (zwei mit Schneiden versehene, vor ähnlichen Schneiden vorbeirotirende Kupferräder) ein-

[1]) Joubert, l. c.

geschaltet. Der Punkt p_2 wurde verändert, bis das Galvanometer keinen Ausschlag zeigte. Dadurch wurde die während $^1/_{20000}$ Secunde in verschiedenen Bewegungsphasen inducirte elektromotorische Kraft bestimmt, welche ebenfalls einer Sinusoide entsprach, die wiederum gegen die bei ruhender Maschine in der Bewegungsrichtung vorgeschoben, und deren Maximum in derselben Richtung vorwärts gerückt war.

Auch wurde eine grosse Anzahl Versuche mittelst eines Thomson'schen tragbaren Elektrometers angestellt, indem das eine Quadrantenpaar dauernd mit der Nadel und zugleich mit dem anderen Paar mit den Punkten der Leitung verbunden wurden, deren Potentialdifferenz E bestimmt werden sollte. Der Ausschlag ist E^2 proportional. Zu beachten ist dabei, dass die Wurzel aus der Summe der Werthe E^2 für die verschiedenen Bewegungsphasen der inducirten Spirale nicht der Summe der direct durch das Galvanometer beobachteten Werthe E gleich ist.

Die Einzelheiten der Beobachtungen, welche nur für die speciell benutzte Maschine gelten, ergeben, dass bei verschiedenen Widerständen R die mittlere Intensität der Formel:

$$I = \frac{c}{(d^4 + R^2)^{1/2}}$$

sehr nahe entspricht, wo c und d Constante sind. Für die elektrodynamische Arbeit:

$$W = RI^2 = \frac{Rc^2}{d^2 + R^2}$$

wird das Maximum erreicht, wenn $d = R$ ist. Ist die Maschine offen, so verbraucht sie keine Arbeit. Für verschiedene Geschwindigkeiten der Rotation (500 bis 1070) ist d umgekehrt proportional der Umdrehungszeit T.

Die Beobachtungen bestätigen also die Berechnungen des §. 449.

452 Werden Magnete in der Nähe von geschlossenen Stromkreisen bewegt, in denen sie Ströme induciren, welche ihrer Bewegung entgegenwirken, so muss die in den Stromkreisen erzeugte Wärmemenge der zur Bewegung der Magnete verwendeten Arbeit entsprechen, vorausgesetzt, dass in den Magneten selbst nicht Wärmewirkungen, sei es durch Inductionsströme, sei es durch Reibung ihrer Molecüle an einander bei etwaigen Veränderungen ihrer Magnetisirung auftreten, die Magnete also als unveränderlich zu betrachten sind. Dasselbe ergiebt sich bei Bewegung der Stromkreise vor den ruhenden Magneten. — Auf diese Weise hat Leroux[1]) eine grosse Magnetelektrisirmaschine, bei welcher viele, an einer Axe befestigte Spiralen vor Hufeisenmagneten rotirten, in Bewegung gesetzt, indem er um die Rotationsaxe eine mit Gewichten belastete Schnur wand. Er bestimmte jedesmal die beim Hinabrollen

[1]) Leroux, Ann. de Chim. et de Phys. 50, p. 473, 1857*.

derselben erzeugte Arbeit A, zuerst als die Inductionsspiralen nicht eine in sich vollendete Schliessung bildeten. Sodann wurde in den Schliessungskreis ihrer Leitungsdrähte eine kleine Platindrahtspirale eingefügt, welche in einem mit Wasser gefüllten Calorimeter lag, und wiederum die zur Drehung der Maschine erforderliche Arbeit A_1 und zugleich die in der Platinspirale entwickelte Wärmemenge W bestimmt. Da man den Widerstand des ganzen Schliessungskreises mit dem der Spirale verglichen hatte, konnte man auch die in ihm erzeugte totale Wärmemenge messen, welche dem Werthe $A_1 - A$ äquivalent sein musste. Die Erwärmung eines Grammes Wasser um 1° C. erforderte hiernach bei drei Versuchen eine Arbeit von 469,67, 462,23, 442, im Mittel von 458 kgm; eine etwas zu hohe Zahl, da auch in den Magneten der Maschine selbst ein Theil der Wärme erzeugt wurde, welche nicht berechnet war.

Wurde in den Schliessungskreis ein Voltameter mit Kupfervitriollösung eingeschaltet, die sich zwischen einer negativen Platin- und zwei positiven Kupferelektroden befand, welche die Platinelektrode beiderseits umgaben, so wurde, abgesehen von der in dem Kreise erzeugten Wärme, in dem Voltameter für den Absatz jedes Grammes Kupfer eine Arbeit von 252 kgm verbraucht. Dieselbe war wohl in Folge der ungleichen Cohäsion des an der positiven Elektrode aufgelösten und an der negativen abgesetzten Kupfers verwendet worden.

Bei den dynamoelektrischen Maschinen sind analoge Betrachtungen anzustellen wie bei den magnetelektrischen, nur ist das magnetische Moment M des erregenden Magnetes von der Stromintensität i abhängig, wobei es sich einem Maximum nähert. Die Formel $M = ai/(b + ci)$ kann nach Frölich[1]) zur Darstellung dieser Annäherung dienen. 453

Dann sind zu betrachten 1) die Induction des festen Magnetes auf die rotirende Umwickelung; 2) die Inductionswirkung des magnetisch werdenden rotirenden Eisenkernes, dessen Pole im Raume ihre Stelle bewahren, auf dieselbe; 3) die Induction der einzelnen Abtheilungen der rotirenden Umwickelung auf die übrigen Leitertheile.

Wir wollen dabei mit Clausius[2]), welcher die einzelnen inducirenden Ursachen scharf aus einander gehalten hat, eine Construction der Maschine betrachten, bei der die zwei Contactfedern die rotirende Umwindung an zwei diametral gegenüberstehenden Stellen berühren und sie so in zwei Hälften theilen, durch welche beide neben einander der inducirte Strom den Contactfedern zuströmt. Die Umwindung sei in n einzelne Abtheilungen getheilt; ihre Umlaufszeit sei τ, ihre Umlaufszahl in der Zeiteinheit $v = 1/\tau$.

---

[1]) Frölich, Berl. Monatsber. 1880, p. 962*; Elektrotechn. Zeitschr. 2, p. 134, 170, 1881*; Beibl. 5, p. 542*. — [2]) Clausius, Wied. Ann. 20, p. 353, 1883*. — Wir beschränken uns auch hier, der wesentlich technischen Interessen wegen, auf kurze Andeutungen.

454 1) Induction durch den Elektromagnet in den Windungen. Ist das Potential des Elektromagnets, dessen Umwindungen wir als geschlossen ansehen können, so dass die §. 78 u. f. entwickelten Inductionsgesetze gelten, auf eine Abtheilung der rotirenden Umwickelung zur Zeit t gleich W, und ist dasselbe am Anfang und Ende eines während der Zeit von t_1 bis $t_1 + {}^1/_2\,\tau$ zurückgelegten halben Umlaufs gleich W' und W'', so ist, da die Stromesrichtung bei jeder halben Umdrehung in der äusseren Leitung durch den Commutator umgekehrt wird, sich also die Inductionswirkungen während der ganzen Umdrehung addiren, die während derselben in jener Abtheilung inducirte elektromotorische Kraft

$$-\frac{2}{\tau}\int\limits_{t_1}^{t_1+{}^1/_2\tau}\frac{dW}{dt} = \frac{2}{\tau}\,(W' - W'') = 2\,v\,(W' - W'').$$

Da die n Abtheilungen zwei neben einander laufende Parallelleitungen bilden, so ist die in allen zusammen während eines Umlaufs inducirte elektromotorische Kraft

$$E_1 = \frac{n}{2}\cdot 2\,v\,(W' - W'') = n\,v\,(W' - W'').$$

455 2) Die Induction des bewegten Leiters auf den festen Leiter ist bei jeder Umdrehung ins Gesammt gleich Null, da sich die bei der Bewegung und bei den Umkehrungen der Stromesrichtung inducirten elektromotorischen Kräfte gegenseitig aufheben.

3) Beim Vorbeigang bei den Contactfedern tritt jede Leiterabtheilung von der einen Hälfte der drehbaren Umwickelung in die andere über, wobei sie während der Berührung mit der Feder in sich geschlossen ist. Sowohl während dieser letzteren Zeit, wie beim Uebertritt in die zweite Hälfte findet eine Stromänderung statt und beide bewirken eine Selbstinduction in der Abtheilung.

Der während der Schliessung durch die Feder in der Abtheilung auftretende Antheil derselben gelangt eben wegen des Schlusses nicht in die übrige Leitung; da die zu beiden Seiten der Abtheilung liegenden Abtheilungen in gleicher Weise von der ersteren inducirt werden, heben sich auch diese Wirkungen auf.

Die Selbstinduction beim Uebertritt der betrachteten Abtheilung in die zweite Hälfte der drehbaren Umwickelung hat aber nach beiden Richtungen einen Einfluss; einmal weil sie in die ganze geschlossene Leitung eingetreten ist, sodann, weil auch die ihr zu beiden Seiten befindlichen Nachbarabtheilungen sich nicht ganz gleich verhalten; da die eine durch die Contactfeder in sich geschlossen ist, die andere in der Gesammtleitung liegt. Es ist also nur die Induction in letzterer zu berücksichtigen. Diese Inductionswirkungen sind im Allgemeinen der Intensität i des Stromes in beiden Hälften und der Drehungsgeschwindigkeit proportional; also die ihnen entsprechende elektromotorische Kraft

für den ganzen rotirenden Leiter $E_2 = - \varrho i v$, wo ϱ eine Constante ist.

Demnach ist die gesammte inducirte Kraft bei einer Umdrehung $E = E_1 + E_2 = n(W' - W'')v - \varrho i v$. Da die Potentiale W' und W'' der Länge jeder Abtheilung, also $1/n$ proportional sind, so ist E_1 von n fast unabhängig. Dagegen ist ϱ dem Quadrat der Länge jeder Abtheilung, also $1/n^2$ proportional. Da n Abtheilungen vorhanden sind, so ist mithin E_2 nahezu $1/n$ proportional. Da sich ferner E_2 von E_1 subtrahirt, so muss n möglichst gross gemacht werden, um eine möglichst starke elektromotorische Kraft zu erhalten.

456 Die während der Zeiteinheit von der elektromotorischen Kraft E geleistete Arbeit ist

$$E \,.\, i = n i (W' - W'') v - \varrho i^2 v.$$

Der erste Theil dieser Arbeit der inducirten elektromotorischen Kraft lässt sich mit der ponderomotorischen Arbeit vergleichen, welche durch die elektromagnetische Kraft zwischen dem Magnet und der rotirenden Umwickelung geleistet wird. Fliesst durch die letztere der Gesammtstrom i, also durch jede Hälfte der Strom $\frac{1}{2} i$, so ist die Arbeit während eines halben Umlaufs einer einzelnen Abtheilung gleich $\frac{1}{2} i (W'' - W')$, also während der Zeiteinheit für die n Abtheilungen der ganzen Umwickelung gleich $T = n(W'' - W') i v$. So ist mit Hinzunahme der vorigen Gleichung

$$E i = T - \varrho i^2 v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Um den Werth T zu bestimmen, ist die Magnetisirung des vom rotirenden Gewinde umgebenen Eisenkerns zu betrachten. In demselben werden durch die Pole des festen Magnets und des Stromes im Gewinde zwei auf einander senkrechte Polaritäten P_1 und P_2 in (in Bezug auf erstere) axialer und äquatorialer Richtung erregt, welche Functionen der magnetischen Momente M und N derselben sind und im Allgemeinen durch die Formeln $CM/(1 + \gamma M)$ und $CN/(1 + \gamma N)$ wieder gegeben werden können, wo C und γ Constante sind. Unter der Annahme, dass sich N noch nicht dem Maximum nähert, kann $N = B i$ gesetzt werden, wo B eine neue Constante ist.

Ist der Winkel zwischen P und der axialen Richtung gleich φ, so ist

$$P_1 = P \cos \varphi, \quad P_2 = P \sin \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Die Grösse der Resultante beider Polarisationen lässt sich durch die Formel $P = C Q/(1 + \gamma Q)$ darstellen, wo $Q = \sqrt{M^2 + N^2}$ ist und Clausius den Nenner durch $1 + \beta i$ ersetzt, wo β eine neue Constante ist.

457 Ruht der Eisenkern, so wird auf die rotirende Abtheilung eine ponderomotorische Kraft ausgeübt, einmal vom rotirenden Magnet, welche der Drehung entgegenwirkt und gleich $-hMN$ gesetzt werden kann,

dann von der auf der Axe der Abtheilung senkrechten Componente P_1 der Magnetisirung des festen Kerns, welche gleich $-kNP_1$ zu setzen ist. Die von der ponderomotorischen Kraft geleistete Arbeit ist also

$$T = -hMNv - kNP_1v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

welcher Werth in die Gleichung 1) einzuführen ist.

Rotirt der Eisenkern langsam mit der Spirale, und nimmt man zunächst an, dass seine Polarität in jedem Moment die gleiche wäre, wie wenn er ruhte, so verschiebt sich dieselbe gegen die einzelnen Theile der rotirenden Spirale in gleicher Weise, wie wenn die Spirale allein rotirte; die Arbeit der inducirten elektromotorischen Kraft ist also die gleiche, wie vorher.

Bei Berechnung der hiermit zu vergleichenden ponderomotorischen Arbeit ist zu bedenken, dass wenn Magnet und Umwickelung des Eisenkerns fest sind, und nur der Eisenkern drehbar, letzterer in Ruhe bleibt, so dass die auf ihn vom Magnet und von ihm auf die Umwickelung ausgeübten Drehungsmomente gleich und entgegengesetzt sind. Die direct gleich $k'MP_2v$ zu setzende Arbeit bei der Rotation des Eisenkerns mit der Spirale durch die Einwirkung des festen Magnets ist also gleich der früher gefundenen $-kNP_1v$. Ersetzt man hier P_2 und P_1 durch die Werthe aus Gl. 2), so wird $k = k'$.

458 Bei schneller Rotation verändert sich einmal, meist in Folge der Trägheit des Eisens beim Magnetisiren, der Winkel φ zwischen der magnetischen Axe des Eisenkerns und der Verbindungslinie der Pole des festen Magnets proportional der Drehungsgeschwindigkeit, so dass dieselbe $\varphi' = \varphi + \varepsilon v$ wird; auch nimmt die Stärke der Pole in ähnlichem Verhältniss ab, so dass nun die Resultante der Magnetisirung $P' = P \cos \varepsilon v$ wird und die Componenten in axialer und äquatorialer Richtung bei Entwickelung in eine Reihe $P_1' = P' \cos \varphi' = P(\cos \varphi - \varepsilon v \sin \varphi)$ und $P_2' = P' \sin \varphi' = P(\sin \varphi + \varepsilon v \cos \varphi)$ sind.

In Folge der bei schneller Bewegung der Maschine auftretenden, ε enthaltenden Glieder wird die zur Erzeugung eines galvanischen Stromes von bestimmter Intensität zu verwendende äussere Arbeit vermehrt.

Ferner entstehen durch die Induction in der Eisenmasse elektromotorische Kräfte, welche darin geschlossene Bahnen finden, wenn dieselben nicht zweckmässig zertheilt sind. Diese Ströme haben einmal selbst ein magnetisches Moment $(P)_a$; sodann vermehren sie das vorhandene Moment des Eisens um das Moment $(P)_b$, welche beide auf der Axe des früheren Momentes senkrecht stehen. Die Werthe derselben lassen sich durch $\eta v Q$ und $D\eta v Q/(1 + \beta i)$ darstellen; um ihre Componenten nach der axialen und äquatorialen Richtung zu erhalten, ist ihre Summe mit $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ zu multipliciren. Werden die Werthe für $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ hier eingeführt, und setzt man $\varepsilon' = \varepsilon + D\eta / C$, so werden dieselben

$$P_1'' = \frac{C}{1 + \beta i}(M - \varepsilon' v N) - \eta v N$$

$$P_2'' = \frac{C}{1 + \beta i}(N + \varepsilon' v M) - \eta v M.$$

In der Gleichung 1) ist in T, wenn der Eisenkern rotirt, statt NP_1 der Werth MP_2 zu setzen (s. oben); dann wird bei Vertauschung von P_1 und P_2 mit P_1'' und P_2'', wenn noch $M = Ai/(1 + \alpha i)$ und wie oben $N = Bi$ gesetzt wird:

$$T = \frac{AB}{1 + \alpha i}\left[\left(h + \frac{kC}{1+\beta i}\right)v + \frac{kA^2}{(1+\alpha i)^2}\left(\eta + \frac{\varepsilon' C}{1+\beta i}\right)v^2\right]i^2 \quad . \quad 4)$$

$$E = \frac{AB}{1 + \alpha i}\left[\left(h + \frac{kC}{1+\beta i}\right)v - \varrho v - k B^2\left(\eta + \frac{\varepsilon' C}{1+\beta i}\right)v^2\right]i \quad . \quad 5)$$

Hat die ganze Schliessung den Leitungswiderstand R, so ist die Stromintensität $i = E/R$.

Die Gleichung 5) ist nach i quadratisch, durch Ableitung aus einer cubischen entstanden, so dass ausser der, für alle Werthe von v positive Werthe von i gebenden Wurzel auch die Wurzel $i = 0$ Geltung hat. Dieser Werth gilt für kleine Drehungsgeschwindigkeiten, wo die Maschinen „todte Touren“ machen.

459 Ist eine dynamoelektrische Maschine auf das Maximum ihrer Leistung gekommen, wo also das Moment der Eisenmassen constant wird, so gilt dann ebenso, wie bei der Magnetelektrisirmaschine, das Ohm'sche Gesetz. Dies ist durch mehrfache Versuche bewiesen, bei denen man zugleich, entsprechend dem Anwachsen des Magnetismus bei grösseren Widerständen, eine anfangs schnellere, später langsamere Zunahme der Ströme bis zum Maximum beobachtete [1]).

460 Die Untersuchung der Leistungen einer Magnetelektrisirmaschine oder dynamoelektrischen Maschine ergiebt sich ohne Weiteres. Zuerst lässt man sie ohne Schliessung des Inductionskreises verschieden schnell umlaufen und bestimmt durch einen Zaum, resp. durch Aufwinden von Gewichten die zu ihrer Drehung erforderliche Arbeit, welche also zur Ueberwindung der Reibungswiderstände u. s. f. verwendet wird. Dann bestimmt man die Arbeit bei Einschaltung verschiedener Widerstände, nachdem man vorher nach bekannten Methoden den Widerstand der

---

[1]) Vergl. u. A. Hagenbach, Arch. des Sc. phys. Nouv. Sér. 55, p. 255, 1876*; Pogg. Ann. 158, p. 599, 1876*. v. Waltenhofen, Wien. Ber. 80, p. 599, 1879*. Hopkinson, On Elektric. Lighting I., Proc. Inst. Mechanic. Engineers, London, 25. April 1879*. Herwig, Wied. Ann. 7, p. 193, 1879*. O. E. Meyer und Auerbach, Wied. Ann. 8, p. 494, 1880* u. s. f. Das Weitere gehört in das Gebiet der Technik.

Drahtleitung der Maschine selbst gemessen hat. Auch misst man die Intensität der Ströme hierbei, bei gleicher Richtung derselben durch ein Galvanometer (ein Torsionsgalvanometer oder dergl. m.), bei abwechselnder Richtung durch ein (Torsions-)Dynamometer, und erhält durch Multiplication der Intensitäten mit den Gesammtwiderständen die jedesmal inducirten elektromotorischen Kräfte.

Man kann auch bei gleichgerichteten Strömen die Enden des geöffneten Inductionskreises mit den Quadrantenpaaren eines grossen Thomson'schen Elektrometers verbinden und so die Potentialdifferenz an seinen beiden Enden messen. Alterniren die Ströme, so verbindet man das eine Quadrantenpaar und die Nadel mit dem einen oder andern Pol des anderseits abgeleiteten Inductionskreises. Die Ablenkung entspricht dann dem mittleren Werth der Quadrate der Potentialwerthe an dem nicht abgeleiteten Ende[1]). Diese Methode kann auch für gleichgerichtete Ströme verwendet werden.

Ist in den Schliessungskreis der Maschine eine Unterbrechungsstelle eingefügt, an welcher der Strom in Form eines Lichtbogens übergeht (eine elektrische Lampe), so kann man durch eine gleiche Verbindung ihrer Elektroden mit dem Elektrometer die Potentialdifferenz e daselbst bestimmen. Eventuell kann man auch die Elektroden mit einer ein Galvanometer oder Dynamometer enthaltenden Schliessung von so grossem Widerstande r verbinden, dass dagegen der Widerstand an der Unterbrechungsstelle verschwindet. Die aus der Ablenkung berechnete Stromintensität sei i, dann ist wiederum die elektromotorische Kraft an den Elektroden $e = i r$.

Indess genügen diese Bestimmungen noch nicht, über den Werth einer Maschine Aufschluss zu geben. Treten die secundären Wirkungen in den Hintergrund, so ist meist die Nutzleistung auch bei verschiedenen Constructionen der Maschinen nicht allzu verschieden. Um über die zweckmässigste Construction der Maschinen zu entscheiden, muss untersucht werden, ob die inducirten Theile cet. par. möglichst starken magnetischen Kräften ausgesetzt sind, d. h. ob bei dem geringsten Aufwand von Draht u. s. f. dieselben so construirt sind, dass das Maximum der elektromotorischen Kraft erreicht ist. Dazu bedarf es der Untersuchung des Magnetfeldes der Maschinen, sowohl im Ruhezustande, wie bei der Bewegung. Im Allgemeinen lässt sich dies durch Entfernen von kleinen, mit einem Galvanometer verbundenen Inductionsspiralen aus den verschiedenen Theilen des Magnetfeldes erreichen.

---

[1]) Vergl. Joubert, Compt. rend. 91, p. 161, 1881*; Beibl. 4, p. 683*.

III. Elektromagnetische Motoren.

461 Schon Bd. III, §. 187 haben wir Apparate beschrieben, bei welchen durch Anziehung von beweglichen Elektromagneten durch feststehende Stahl- oder Elektromagnete die ersteren in Rotation versetzt werden können. Als derartige Motoren können alle Magnetelektrisirmaschinen und dynamoelektrische Maschinen dienen, wenn man durch ihre Drahtwindungen einen Strom hindurchleitet.

Für praktische Zwecke ist zur Erzeugung dieses Stromes die Anwendung einer gewöhnlichen galvanischen Säule unpraktisch, da sie zu kostbar wird; dasselbe gilt bisher von den Thermosäulen. Auch hat man die secundären Batterien oder Accumulatoren, welche man durch eine dynamoelektrische Maschine geladen hat, zum Treiben einer anderen Maschine an einem anderen Orte verwendet und so die Arbeitsleistung der ersteren daselbst verwerthet. Ueber die Zweckmässigkeit dieser Methode, welche ebenfalls bisher zu hohe Kosten zu verursachen scheint, sind noch weitere Versuche anzustellen. Endlich hat man die Ströme einer dynamoelektrischen Maschine durch eine Drahtleitung zu einer zweiten derartigen Maschine geleitet, letztere in Bewegung gesetzt und zu Arbeitsleistungen verwendet und somit die Arbeit von einem Ort auf den anderen übertragen.

Die nähere Betrachtung dieses rein technischen Gebietes liegt vollständig ausserhalb des Rahmens dieses Werkes. Wir haben hier nur im Allgemeinen die Verhältnisse zu betrachten, welche eintreten, wenn in einem Schliessungskreise ein elektromagnetischer Motor in Bewegung gesetzt wird.

462 Wird durch einen Strom eine elektromagnetische Bewegungsmaschine getrieben, so werden beim abwechselnden Oeffnen und Schliessen des Schliessungskreises oder bei der Umkehrung der Stromesrichtung in den die Elektromagnete umgebenden Drahtspiralen, bei der Annäherung und Entfernung der Magnete und Elektromagnete der Maschine zu und von einander in dem Schliessungskreise der Säule Ströme inducirt, welche die Intensität I des primären Stromes im Mittel auf den kleineren Werth i reduciren. Ist der Widerstand der Schliessung R, so wird, wie in §. 94, die Nebenarbeit, die zum Theil auf die Bewegung der Maschine verwendet wird, durch die Formel $A_i = R(I - i)i$ ausgedrückt[1]).

Würden wir einen Draht vom Widerstand $R(I - i)/i$ in den Schliessungskreis der Säule einschalten, ohne dass der Strom eine äussere Arbeit verrichtete, so würde gleichfalls die Stromintensität auf i reducirt

[1]) Clausius, Arch. 36, p. 119, 1857*; Soret, ibid. p. 123*; vergl. auch Leroux, ibid. p. 186*; Compt. rend. 45, p. 414, 1857*.

werden und die in dem neu hinzugefügten Draht entwickelte Wärme wäre $1/a \cdot R(I-i)i$, wo a das mechanische Wärmeäquivalent ist, so dass also der hinzugefügte Draht gewissermaassen die elektromagnetische Maschine ersetzen könnte. Es würde indess eine unrichtige, nur zu Irrthümern führende Vorstellung sein, wollten wir nach dieser Analogie eine elektromagnetische Maschine, welche durch einen Strom bewegt wird, oder eine Spirale, in der Inductionsströme erregt werden, ohne Weiteres als einen äusseren Widerstand betrachten, welcher zu dem Widerstand der primären Schliessung hinzukommt[1]).

463 Es ist selbstverständlich, dass auch bei der Bewegung einer elektromagnetischen Maschine die gesammte, sei es als Wärme, sei es als Bewegung, durch den Strom geleistete Arbeit den zur Erzeugung desselben erforderlichen chemischen Processen äquivalent sein muss.

Dies hat Favre durch directe Versuche gezeigt, indem er in verschiedene, in ein Calorimeter A eingesetzte, unten geschlossene Muffeln eine Batterie von fünf Smee'schen Elementen mit amalgamirten Zink- und platinirten Platinplatten, und endlich in eine 18 cm tiefe, 12 cm breite Muffel eines zweiten Calorimeters B eine kleine elektromagnetische Bewegungsmaschine einsetzte. Um die Wärmeabgabe der letzteren zu befördern, waren die Eisenkerne derselben nach der Angabe von Foucault statt mit Drahtspiralen, mit übereinandergeschichteten, auf einer Seite aufgeschnittenen Ringen von Blech umgeben, welche in der Art mit einander verlöthet waren, dass sie Schlangenwindungen bildeten. Die einzelnen Windungen waren durch dünne, isolirende Schichten von einander getrennt. Nur die Hauptaxe der Maschine ragte aus der Muffel hervor und stand durch einen Schnurlauf mit einer zweiten, zwischen Spitzen laufenden Axe in Verbindung, auf welche eine mit einem Gewicht belastete, seidene Schnur sich aufwinden konnte. Es wurden folgende Bestimmungen gemacht.

1. Die Säule im Calorimeter A war in sich geschlossen. Die während der Entwickelung von 1 g Wasserstoff in derselben erzeugte Wärmemenge betrug 18682 Wärmeeinheiten. — Fast dieselbe Wärmemenge (18674) ergab sich, als die Säule durch sehr dicke Drähte geschlossen war, die nachher zu ihrer Verbindung mit der Maschine dienten.

2. Die Säule war mit der Maschine verbunden, letztere aber an ihrer Bewegung gehindert. Während der Entwickelung von 1 g Wasserstoff wurden erzeugt: In der Säule 16448, in der Maschine 2219, in Summa also wiederum 18667 Wärmeeinheiten.

3. Bei derselben Verbindung bewegte sich die Maschine, ohne indess ein Gewicht zu heben. Die Wärmemenge betrug in der Säule 13888, in der Maschine 4769, in Summa 18657 Wärmeeinheiten.

---

[1]) Favre, Compt. rend. **45**, p. 56, 1857*; vergl. auch Compt. rend. **46**, p. 658, 1858*.

4. Endlich wurde bei derselben Verbindung durch die Maschine ein Gewicht gehoben, und dadurch eine Arbeit von 131,24 kgm geleistet. Nun betrug die Wärmemenge in der Säule 15427, in der Maschine 2947, in Summa also nur 18374 Wärmeeinheiten. Der Verlust an Wärme 18682 — 18374 = 308 Wärmeeinheiten entspricht aber fast genau der bei der Hebung des Gewichtes geleisteten Arbeit, welche äquivalent ist 131240/423,5 = 309 Wärmeeinheiten.

Würde die elektromagnetische Maschine durch mechanische Hülfsmittel in entgegengesetztem Sinne bewegt, wie es durch den Einfluss des Stromes geschieht, so würde umgekehrt die Intensität des primären Stromes I durch die Inductionsströme vermehrt werden; die zur Bewegung der Maschine verwendete Arbeit würde dann in dem ursprünglichen Schliessungskreise eine Wärmemenge erzeugen, welche sich zu der durch die chemischen Processe der Säule gelieferten addirt. — Die Gesetzmässigkeit dieser Wärmeerzeugung giebt die oben angeführte Formel, wenn man in ihr nur i grösser als I setzt.

Matteucci[1]) hat ebenfalls in einer elektromagnetischen Maschine Anker vor Elektromagneten rotiren lassen, deren Magnetisirungsspiralen aus zwei parallel gewundenen Drähten bestanden. Der magnetisirende Strom wurde nur durch einen dieser Drähte geleitet, und das Gewicht bestimmt, welches durch die Maschine in einer bestimmten Zeit auf eine gewisse Höhe gehoben wurde, je nachdem der zweite Draht offen oder in sich geschlossen war. Im zweiten Falle war die so geleistete Arbeit um eine Grösse A kleiner, indem in dem zweiten Gewinde Extraströme entstanden. Matteucci bestimmte nun die in dem letzteren erzeugte Wärmemenge W durch ein Calorimeter; sie sollte der Arbeit A äquivalent sein. Es berechnete sich so das mechanische Wärmeäquivalent zu 438,96.

464 Der Wärmeverlust in einem Schliessungskreise, welcher durch eine Nebenarbeit des Stromes in demselben hervorgerufen wird, mag dieselbe in der Erzeugung von Inductionsströmen oder in der Hin- und Hermagnetisirung von Eisen oder in der Bewegung einer elektromagnetischen Maschine bestehen, ist nicht allein auf die Theile der Leitung beschränkt, welche jene Wirkungen hervorbringen, sondern muss sich über den ganzen primären Schliessungskreis verbreiten, da die bei jenen Processen erzeugten Inductionsströme ganz durch denselben hindurchgehen. Dies hat auch Soret[2]) nachgewiesen, indem er zwei Drahtspiralen, deren jede auf ein Messingrohr gewunden war, in zwei Calorimeter brachte. Die letzteren bestanden je aus einem, aus zwei concentrischen Cylindern gebildeten Messinggefäss, dessen ringförmiger Zwischenraum, in den die Spiralen eingesetzt waren, mit Terpentinöl gefüllt war. In den

---

[1]) Matteucci, Compt. rend. 46, p. 1021, 1858*; Ann. de Chim. et de Phys. 54, p. 297, 1858*. — [2]) Soret, Arch. 36, p. 38, 1857*; Nouv. Sér. 4, p. 69, 1859*.

mit Luft erfüllten, inneren Hohlraum des einen Calorimeters wurde ein Eisencylinder gebracht und durch beide Spiralen ein oft unterbrochener Strom geleitet. — Die Temperatur des mit dem Eisencylinder versehenen Calorimeters stieg fast um $^1/_5$ stärker an, als die des anderen, obschon die durch einen continuirlichen Strom hervorgebrachten Erwärmungen in den beiden Calorimetern völlig gleich waren. — Wurden die Calorimeter aus Glas geformt, so war ein Unterschied in der Wärmeentwickelung nicht zu bemerken. Das stärkere Ansteigen in dem den Eisencylinder enthaltenden Calorimeter von Metallblech ist also durch die in letzterem inducirten Ströme bedingt. — Bringt man ebenso in zwei mit Terpentinöl gefüllte Calorimeter zwei Drahtspiralen und stellt in die eine derselben einen Eisencylinder, welcher sich gleichfalls in dem Terpentinöl befindet, so steigt wiederum, wenn ein continuirlicher, durch beide Spiralen geleiteter Strom in beiden Calorimetern gleiche Wärmemengen erzeugt, beim Durchleiten eines discontinuirlichen Stromes die Temperatur in dem den Eisencylinder enthaltenden Calorimeter stärker an, da jetzt die auf die Magnetisirung des Eisens verwendete Arbeit sich in demselben in Wärme umsetzt. Schiebt man zwischen die Spirale und den Eisenkern eine in sich geschlossene Röhre von Messingblech, so ist das Ansteigen der Temperatur in dem betreffenden Calorimeter noch bedeutender, da auch in der Röhre Inductionsströme entstehen. — Jedenfalls ist also die durch die Magnetisirung und die Inductionsströme indirect erzeugte Wärme nicht dem Theil des primären Schliessungskreises entzogen, welcher dieselben unmittelbar hervorbringt, da sonst in beiden Calorimetern die Wärmemengen gleich sein müssten.

465 Sehr hübsch kann man den Energieverlust beim Treiben eines Motors im Kreise einer Säule in folgender Weise zeigen: Schaltet man in den Schliessungskreis einer grossen Noë'schen oder Clamond'schen Thermosäule einen in einer evacuirten Glasglocke befindlichen Platindraht und eine Gramme'sche Maschine ein, so glüht bei richtigen Dimensionen der Draht, wenn die Maschine stillsteht, er wird dunkler, wenn sie sich bewegt. Wird die Maschine im Sinne ihrer Rotation durch den Strom schneller bewegt, so erlicht der Draht endlich ganz; dreht man die Maschine entgegen, so erglüht er heller[1]).

466 Es hat keine Schwierigkeit, durch einfache Rechnungen das Maximum der Arbeit in einem in den Schliessungskreis einer Säule eingeschalteten elektromagnetischen Motor in seiner Abhängigkeit von der Drehungsgeschwindigkeit der Maschine zu berechnen, wenn man von der Verzögerung der Inductionsströme u. s. f. abstrahirt[2]).

---

[1]) Crova, Carl Rep. **12**, p. 148, 1876*. — [2]) Jacobi, Pogg. Ann. **51**, p. 370, 1840*; Bullet. de St. Petersburg **9**, p. 289, 1850, 29. Nov.; Krönig's J. **3**, p. 377, 1851*; vergl. auch Koosen, Pogg. Ann. **85**, p. 226, 1852*. Wir

Wir wollen annehmen, alle Elektromagnete der Maschinen seien gleich construirt und haben gleiche Umwindungen mit Kupferdraht. Ist dies nicht der Fall, so sind nur neue Constanten in die Formeln einzuführen. Es sei die elektromotorische Kraft der Säule E, der Gesammtwiderstand ihrer Schliessung r, die Intensität ihres Stromes im Ruhezustand i, dieselbe während der Bewegung der Maschine i^1, der mittlere Magnetismus der Eisenkerne während des Ruhezustandes und der Bewegung m und m^1, die Zahl der Drahtwindungen β, die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit der Maschine v.

Dann ist, wenn k eine von der Construction der Maschine abhängige Constante, $i_1 = i - i^1$ ist: $m^1 = \beta i^1$; $i_1 = km^1 \beta v / r = ki^1 \beta^2 v / r$. Ferner ist $i = E/r$; also

$$i^1 = \frac{E}{r + k\beta^2 v}; \quad m^1 = \frac{\beta E}{r + k\beta^2 v}; \quad v = \frac{\beta E - m^1 r}{m^1 k \beta^2}.$$

Die Arbeit A der Maschine entspricht der mittleren Anziehungskraft der Magnete derselben, multiplicirt mit der Drehungsgeschwindigkeit, also ist

$$A = m^{1^2} v = \frac{v(\beta E)^2}{(r + k\beta^2 v)^2} = \frac{(\beta E - m^1 r) m^1}{k \beta^2}.$$

Das Maximum der Arbeit in Bezug auf m^1 und v tritt ein für $m^1 = m_0^1 = \beta E / 2r$ und $v = v_0 = r / k\beta^2$; wo dasselbe wird

$$A_m = \frac{E^2}{4kr} = \frac{Ei}{4k}.$$

Im Ruhezustande der Maschine ist $m = \beta i = \beta E/r$. Soll also das Maximum der Arbeit erreicht werden, so muss der Magnetismus der Magnete in der Maschine während ihrer Bewegung gerade halb so gross, ihre Anziehung ein Viertel so gross sein, als in ihrem Ruhezustande.

Das Arbeitsmaximum A_m selbst ist direct dem Werthe Ei, d. h. dem Arbeitsäquivalent der chemischen Processe in der Säule im Ruhezustande der Maschine proportional. Bei gleichbleibendem Widerstand der Schliessung ist es unabhängig von der Zahl β der Drahtumwindungen der Magnete. Wachsen diese nämlich auf das n-fache, so nimmt der Magnetismus m_0^1 auf das n-fache, die Anziehung μ^1 der Magnete auf das n^2-fache zu, dagegen nimmt die Geschwindigkeit der Bewegung v_0 der Maschine im Verhältniss von $1 : n^2$ ab.

Setzen wir den Werth v_0 in die Gleichung für i^1 ein, so erhalten wir die dem Arbeitsmaximum entsprechende Intensität $i_0^1 = E / 2r = \frac{1}{2} i$. Sie ist also gerade halb so gross, wie die Intensität beim Ruhezustande der Maschine. — Besteht die Säule aus x Elementen von der elektro-

---

führen diese Rechnung an, als eine der ersten auf diesem Gebiet. Die Resultate von Jacobi sind später wiederholt ohne Erwähnung seines Namens reproducirt worden.

motorischen Kraft e, so ist $E = xe$ und die beim Arbeitsmaximum verbrauchte Zinkmenge

$$z_0 = const.\,x i_0 = \frac{x^2 e}{2r}, \text{ d. h. } A_0 = \frac{z_0 e}{2k}.$$

Die erzeugte Arbeit ist also wiederum der elektromotorischen Kraft e jedes Elementes und der gesammten verbrauchten Zinkmenge z_0 proportional.

Die bei der Einheit der verbrauchten Zinkmenge erzeugte Arbeit ist $e/2k$. Sie ist also völlig unabhängig von der Anordnung der Batterie und der Leitung. Sie würde sich bei gleichem Zinkverbrauch nur durch Aenderung der elektromotorischen Kraft e verstärken lassen.

Ist λ der Widerstand der Oberflächeneinheit der Elemente der Säule, σ die gesammte Oberfläche derselben, λ_1 der Widerstand der Drahtrollen, so ist unter Vernachlässigung der übrigen Widerstände bei Anordnung der Säule zu x Elementen $r = x^2\lambda/\sigma + \lambda_1$, also

$$A_0 = \frac{\sigma x^2 e^2}{4k(x^2\lambda + \lambda_1 \sigma)}.$$

Das Arbeitsmaximum nimmt also bei gleicher Oberfläche der Säule mit der Zahl der Elemente zu. Ist der Widerstand $x^2\lambda$ der Säule so weit gewachsen, dass dagegen $\lambda_1\sigma$ verschwindet, so erhält man nun das Arbeitsmaximum $A_0 = \sigma e^2/4k\lambda$. Im Ruhezustande der Maschine würde man das Maximum der Magnetisirung der Magnete erhalten, wenn $x^2\lambda/\sigma = \lambda_1$ ist. Bei dieser Anordnung der Säule wäre die Arbeit gleich $A_0 = \sigma e^2/8k\lambda$, also gerade halb so gross, wie das wirklich zu erreichende Arbeitsmaximum.

467 Sehr viel complicirter werden die Verhältnisse, wenn man, wie bei der Kraftübertragung durch Elektricität, den den elektromagnetischen Motor treibenden Strom durch eine mittelst einer Dampfmaschine oder einer anderen Triebkraft bewegten Magnetelektrisirmaschine oder durch eine dynamoelektrische Maschine erregen lässt und auch noch an Stelle des Motors eine derartige Maschine verwendet. In beiden Maschinen treten dann Inductionsströme auf, deren Berechnung unmittelbar aus den bekannten Principien folgt. Diese Berechnungen gehören nicht hierher [1]).

---

[1]) Siehe namentlich eine während des Druckes erschienene Abhandlung von Clausius, Wied. Ann. **21**, p. 385, 1884*.

VII.

ELEKTRISCHES VERHALTEN

DER

GASE.

Erstes Capitel.

Entladungen in sehr verdünnten Gasen.

I. Einleitung.

Stellt man zwei kugelförmige oder spitze Elektroden, z. B. von Platin oder Kohle, welche in eine mit einem Hahn versehene Glaskugel eingekittet sind, mit ihren Enden einander gegenüber, und entfernt so vollständig wie möglich die Luft aus der Kugel durch Auspumpen oder besser noch, indem man sie durch Kohlensäure verdrängt, letztere evacuirt und den Rest durch etwas Kalihydrat absorbiren lässt, welches in einem kleinen Ansatz an die Kugel geschmolzen wird, so geht bei Verbindung der Elektroden mit einer Elektricitätsquelle, z. B. den Polen einer Holtz'schen Elektrisirmaschine oder eines Inductoriums Elektricität erst bei äusserst hohen Spannungen zwischen denselben über, obgleich in dem fast gasleeren Raume Influenzerscheinungen, Anziehungen unelektrischer Körper durch elektrisirte u. s. f. nachzuweisen sind [1]). Wird eine geringe Spur Gas in die Kugel gebracht, so bedarf es immer noch sehr grosser Potentialdifferenzen auf beiden Kugeln, um einen Uebergang der Elektricität zu bewirken. Werden die Elektroden mit einer Elektricitätsquelle, z. B. einer Influenzmaschine, in Verbindung gebracht, welche fortdauernd hohe Potentiale erzeugen kann, so erscheinen die auf einander folgenden elektrischen Entladungen in sehr langen Intervallen hinter einander und dann immer instantan. Wird mehr Gas in die Kugel gebracht, so werden die je zum Beginn einer Entladung erforderlichen Potentiale sämmtlicher Elektricitäten auf die auf der Einheit der Oberfläche an der Entladungsstelle angehäufte Elektricität kleiner, bei constanter Elektricitätszufuhr folgen die einzelnen Entladungen schneller auf einander. Man kann sich hiervon überzeugen, wenn man vor der Kugel einen Spiegel um eine Axe rotiren lässt, welche der Verbindungs-

468

---

[1]) Worthington, Nature 27, p. 434, 1883*; Beibl. 8, p. 50*.

linie der Elektroden parallel ist. Bei constanter Geschwindigkeit desselben rücken bei wachsendem Drucke des Gases die in ihm gesehenen Entladungsbilder immer näher an einander, bis ein bestimmter, von den Dimensionen der Röhre, der Gestalt der Elektrode u. s. f. der Grösse nach abhängiger kritischer Druck erreicht ist. Wird von hier an der Druck weiter gesteigert, so entfernen sich die Entladungsbilder wieder von einander, die zur Einleitung einer Entladung erforderliche Ladung der Elektroden wächst immer mehr mit wachsendem Druck.

Dabei zeigen die Entladungen bei mittleren Drucken bei Beobachtung im Spectroskop nur die Spectra der in der Kugel befindlichen Gase, bis dieselben eine gewisse, beträchtlich oberhalb des kritischen Punktes liegende Dichtigkeit erhalten haben. Dann treten namentlich zuerst an der positiven Elektrode kleine helle Lichtbüschel auf, welche das Spectrum des Metalls der Elektrode neben dem Gasspectrum zeigen, mit wachsendem Gasdruck und wachsendem Potential der Elektricitäten immer grösser und heller werden und zuletzt einen die beiden Elektroden verbindenden Funken darstellen. Auch bei sehr niederen Drucken, bei welchen wiederum zur Entladung sehr hohe Potentiale erforderlich sind, zeigen sich die Metalllinien.

In allen Fällen sind aber bei gleichförmiger schwacher Elektricitätszufuhr zu den Elektroden die Entladungen diruptiv, d. h. sie erfolgen plötzlich und nur bei einem bestimmten endlichen, von dem Druck und der Natur des Gases abhängigen Potential, und die Elektricitäten gleichen sich nicht zwischen den Elektroden in einem continuirlichen Strome, wie etwa in flüssigen oder metallischen Leitern aus[1]).

Wir werden in den folgenden Abschnitten diese Entladungsarten specieller studiren und behandeln zunächst den Durchgang der Elektricität durch verdünnte Gase ohne directe Theilnahme der Stoffe der Elektroden.

II. Gasentladungen.

1. Allgemeine Uebersicht.

469 Der Durchgang des Stromes einer Leydener Batterie durch ein mit sehr verdünnter Luft gefülltes, 3′ langes, etwa 3″ weites Glasrohr mit zwei Messingstäben als Elektroden ist zuerst von Watson[2]) beobachtet

---

[1]) Wie eine fortschreitende Verdünnung des Gases in den Entladungsapparaten, wirkt selbstverständlich die Abkühlung, wenn Dämpfe, z. B. von Wasser oder Quecksilber sich darin befinden. Vergleiche Davy, Phil. Trans. 1822*; Gilb. Ann. 72, p. 362*. Krajewitsch, Jahrb. d. russ. phys. chem. Ges. 13, p. 266, 1881*; Beibl. 6, p. 514*. — [2]) Watson, Phil. Trans. 1751 p. 362*.

worden; später auch von Walsh[1]), der aus einer langen, Ω förmigen Röhre ein Doppelbarometer herstellte und das eine der beiden Gefässe desselben mit dem Conductor der Elektrisirmaschine, das andere mit der Erde verband. Dabei enthält das Vacuum noch Quecksilberdampf[2]).

Auch stellte Walsh[3]) ein Barometer aus einer oben zu einer zollgrossen Kugel erweiterten Glasröhre her. Wurden Funken auf die Kugel geleitet, so leuchtete das Innere der Kugel. Bei stärkerer Verdünnung der Luft breitete sich die Lichterscheinung weiter aus[4]).

Bewegt man das Quecksilber in einer Barometerröhre oder schliesst man einen Quecksilbertropfen in eine evacuirte Glasröhre ein und lässt ihn in derselben hin- und herrollen, so werden Glas und Quecksilber bei ihrer Reibung an einander elektrisch und indem ihre entgegengesetzten Elektricitäten sich durch das verdünnte Gas ausgleichen, entsteht ein bläulicher Lichtschein in den Röhren[5]). Ebenso zeigt sich das Leuchten, wenn man durch einen Holzpfropfen Quecksilber in eine evacuirte Glasglocke strömen lässt, unter der eine zweite Glocke von dem Quecksilberregen getroffen wird.

Auch wenn man eine evacuirte Glaskugel in Rotation versetzt und aussen mit der Hand berührt, oder eine evacuirte Glasröhre durch die trockene Hand zieht, wobei sie elektrisch wird, zeigt sich in Folge der im Inneren der Röhre vertheilten Elektricitäten eine der Hand folgende Lichterscheinung.

Man kann die elektrischen Entladungen in Gasen mittelst verschiedener Apparate studiren: 470

Man setzt auf den Glasteller einer Luftpumpe, in dessen Mitte man eine mit den Metalltheilen der Pumpe verbundene Metallkugel eingeschraubt hat, eine Glasglocke, Fig. 134 (a. f. S.), welche in einem Tubulus oberhalb einen mit einer Metallkugel versehenen Metallstab trägt. Oder man bedient sich eines sogenannten elektrischen Eies. Eine längliche Glaskugel, Fig. 135, ist auf zwei gegenüberliegenden Stellen tubulirt. In den einen Tubulus ist eine Stopfbüchse gekittet, durch die ein Metallstab *cb* auf und nieder geschoben werden kann, welcher im Inneren der Glaskugel eine Metallkugel *b* trägt. Auf den anderen Tubulus ist eine Messingfassung aufgekittet, welche einen zweiten Metallstab mit einer Kugel *a* trägt. Ausserhalb ist an der Fassung ein mit einer Schraube versehener Hahn *h* angebracht, vermittelst dessen die Glaskugel auf die Luftpumpe aufgesetzt und evacuirt oder auch mit verschiedenen Gasen

---

[1]) Walsh, siehe de Luc, Idées sur la Météorologie, [1] 1, cap. 3, p. 52, Paris 1787; Gilb. Ann. 11, p. 161*. Morgan, Phil. Trans. 1785, p. 271*, auch Cavendish. — [2]) Vergl. auch Davy, l. c. — [3]) Walsh. Aehnliche Beobachtungen an evacuirten Glascylindern u. s. f. von Beccaria (Elettricismo art. p. 105, 222*) und Nollet (ibid. p. 103*). — [4]) Siehe die Literatur in Riess, Reibungselek. 2, p. 145 u. flgde. — [5]) Dieser Lichtschein ist zuerst von Picard im Jahre 1875 beobachtet worden, siehe Riess, l. c. Hawksbee, Phil. Trans. 1706*.

gefüllt werden kann. Ein Holzteller dient dazu, das elektrische Ei nach dem Abnehmen von der Luftpumpe aufzustellen. An die beiden Fassungen des Eies sind Klemmschrauben gelöthet, in welche die Elektroden

Fig. 134.

Fig. 135.

des Inductionsapparates eingesetzt werden können. — Freilich wirkt bei diesem Apparate die Ladung der Glaswand durch die Elektricitäten bis zu einem gewissen Grade störend auf die Vorgänge; indess lässt sich der Gang der Erscheinungen doch genügend beobachten.

Will man diesen Einfluss beseitigen, so ersetzt man die Glaskugel des elektrischen Eies durch eine hohle, an einer Stelle mit einem innen mit Metallnetzen vergitterten Fenster versehene Metallkugel, von welcher die Zuleitungsdrähte durch aufgekittete Glasröhren isolirt sind. Man setzt die letzteren mittelst Kautschukstöpseln in die Tubuli der Blechkugel ein. Durch ein seitlich angebrachtes Rohr wird die Luft ausgepumpt.

471 Man verwendet auch engere Glasröhren, sogenannte Entladungsröhren, in welche die Elektroden eingeschmolzen sind. Diese Röhren sind zuerst von Gassiot und Geissler in den mannigfachsten Formen hergestellt worden und werden häufig auch mit dem Namen Geissler'sche Röhren bezeichnet.

Dieselben bestehen, Fig. 136 bis 141, aus Glasröhren, in welche an beiden Enden Drähte von Platin oder anderen Metallen eingeschmolzen sind, die mit verschiedenen Gasen gefüllt, sodann durch eine Luftpumpe recht vollständig (bis $^1/_4$ mm bis 1 mm Druck) evacuirt und end-

Fig. 136. Fig. 137. Fig. 138. Fig. 139. Fig. 140.

lich zugeschmolzen werden. Fig. 141 stellt eine solche, auf ein geeignetes Stativ aufgelegte Röhre von besonderer Form dar. Gassiot hat diese Röhren häufig so hergestellt, dass er in den oberen Theil eines 35 bis

Fig. 141.

40 Zoll langen Barometerrohres in einem beliebigen Abstande zwei Platindrähte einschmolz, sodann das Rohr mit Quecksilber füllte, in dem die Platindrähte enthaltenen Theile des Rohres das Torricelli'sche Vacuum herstellte und nun jenen Theil abschmolz. Das abgeschmolzene Rohr enthält dann ausser den an den Wänden haftenden Gasen, Luft,

Wasserdampf, auch noch Quecksilberdampf. — Bei anderen Versuchen bediente sich Gassiot[1]) eines mit Quecksilber gefüllten Rohres von der Gestalt Fig. 137, in welches bei *a* und *b* zwei Platindrähte eingeschmolzen waren. Durch den Hahn wurde die Luft ausgepumpt, wodurch das Quecksilber im Rohr *ab* sank und das Vacuum hergestellt war.

Die Entladungsröhren, welche in der Mitte ein Capillarrohr enthalten, Fig. 139, eignen sich besonders zur Untersuchung des Lichtes der Entladungen durch ein Spectroskop. Man nennt sie deshalb Spectralröhren. Viele Röhren sind direct mit dem betreffenden Gase gefüllt und nach dem Evacuiren zugeschmolzen. Will man die Gase darin aber wechseln und unter verschiedenem Drucke beobachten, so versieht man sie zweckmässig an beiden Enden mit Glashähnen[2]) (Fig. 140). Man nennt diese Röhren auch Wüllner'sche Röhren.

Die Elektroden stellt man am besten aus Aluminium her, wenn dasselbe nicht von dem in der Röhre befindlichen Gase (Chlor) angegriffen wird, da sie relativ wenig bei fortgesetztem Gebrauch zerstäubt werden und so ihre Theilchen nicht die Glaswand überziehen. Zweckmässig schraubt man die Aluminiumelektrode (z. B. eine Kugel) an einen Platindraht, welcher bis an sein Ende mit Glas umhüllt ist. Will man die Verbindungen schnell und sicher herstellen, so lässt man ihn in einem, aussen auf die Entladungsröhre aufgesetzten, mit Quecksilber gefüllten Glasrohr endigen[3]), Fig. 142.

Fig. 142.

472 Je nach den zur Erzeugung der Entladung verwendeten Elektricitätsquellen kann man verschiedene Fälle unterscheiden:

α) Wenn den Elektroden ein sehr schwacher Elektricitätsstrom zugeführt wird, so dass sich nach einem Uebergange der Elektricität zwischen denselben bis zu dem folgenden Uebergange (s. w. u.) wieder der frühere Zustand des Gases vor der Entladung herstellt, wie z. B. bei der Verbindung der Elektroden mit den Conductoren einer Elektrisirmaschine.

β) Wenn die Elektricität durch Inductorien oder Condensatoren geliefert wird, in deren Innerem sich je nach der Capacität und der Construction des Apparates eine grössere oder geringere Elektricitätsmenge, ausser an ihren Polen, ansammelt, und so die Elektricitätszufuhr zu den Elektroden auch nach dem ersten Uebergange zwischen den Elektroden noch eine gewisse Zeit bedeutend ist, dann aber allmählich aufhört, wobei noch die Entladungen alterniren können.

---

[1]) Gassiot, Athenäum 1854, p. 1177*; Phil. Trans. 1858, 1, p. 1*. — [2]) Wüllner, Lehrbuch, 4. Aufl., 2, p. 294, 1883*. — [3]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 206, 1880*.

γ) Wenn die Zufuhr der Elektricität continuirlich so bedeutend ist, dass nach dem ersten Uebergange der Elektricität zwischen den Elektroden sich nicht mehr der frühere Zustand des Gases herstellt, wie z. B. bei Verbindung derselben mit den Polen einer galvanischen Säule von grosser elektromotorischer Kraft und geringem Widerstande.

473 Die quantitativen Verhältnisse der Entladung sind in dem ersten der erwähnten Fälle am einfachsten; die qualitativen lassen sich auch mit Hülfe eines Inductoriums beobachten, vorausgesetzt, dass man im letzteren Falle nur einseitig gerichtete Ströme durch die Entladungsapparate fliessen lässt und die complicirenden Umstände berücksichtigt.

Wir werden später ausführlicher mittheilen, dass bei niederen Drucken zur Entladung an der positiven Elektrode ein grösseres Potential der gesammten Elektricitäten auf die an der Entladungsstelle auf der Einheit der Oberfläche aufgehäufte Elektricität erforderlich ist, als an der negativen. Sind daher die Elektroden ungleich gestaltet, sind sie z. B. eine Spitze und eine Fläche, so kann in gewissen Fällen unter bestimmten Drucken bei gleichen, aber abwechselnd gerichteten Strömen, nur der Strom hindurchgehen, für welchen die Spitze als negative Elektrode dient.

In anderen Fällen können bei gleichen Elektroden von einer Reihe alternirender Ströme, welche verschieden dicht verlaufen, wie z. B. die Oeffnungs- und Schliessungsströme eines Inductoriums, nur die ersteren, dichteren das verdünnte Gas durchbrechen, indem nur durch sie das erwähnte Potential die zur Entladung erforderliche Höhe erreicht. Deshalb erscheinen die Inductionsströme in einer Entladungsröhre meist einseitig, der Richtung des Oeffnungsstromes entsprechend gerichtet, was man an dem z. B. im Stickstoff und in der Luft nur an der einen Elektrode auftretenden blauen Licht erkennen kann (siehe weiter unten). Aus diesem Grunde erscheinen die allgemeinen, qualitativen Verhältnisse der Entladung bei Anwendung des Inductoriums, abgesehen von einigen Complicationen durch die Zeitdauer der Entladung, ganz ähnlich, wie bei derjenigen einer Elektrisirmaschine.

Bei Anwendung einer galvanischen Säule können ähnliche Erscheinungen auftreten, wenn der Strom derselben die Elektricitäten den Elektroden nur langsam zuführt, so dass sich dieselben nach jeder Entladung allmählich von Neuem laden müssen. Sonst ändern sich die Verhältnisse. Wir werden sie später im Zusammenhange betrachten.

474 Evacuirt man die auf den Luftpumpenteller gesetzte Glasglocke (Fig. 134) und verdünnt die Luft bis auf 2 bis 3 mm, so zeigt sich bei Verbindung der Elektroden mit den Polen einer Influenzmaschine die ebendaselbst gezeichnete Erscheinung. Von der oberen positiven Kugel geht eine spindelförmig sich erweiternde und nachher gegen die negative Kugel zusammenlaufende Lichtmasse aus, welche, namentlich wenn man etwas Terpentinöl, Alkohol, Aether, Phosphor unter die Glocke gebracht hat,

in einzelne abwechselnd hellere und dunklere, gegen die positive Elektrode concave Schichten getheilt ist. Dieselbe erreicht indess die negative Elektrode nicht ganz, sondern bleibt von ihr durch einen dunklen Raum getrennt. In Luft ist sie röthlich gefärbt. Die negative Elektrode ist bei höheren Drucken von einer schwachen Lichthülle bedeckt, bei niederen Drucken verschwindet dieselbe und es treten nur einige leuchtende Punkte auf. Sie ist von einer dunklen Schicht, der „dunklen Kathodenschicht“, umgeben, auf welche wiederum eine hellere Lichthülle folgt, die gegen die Anode hin in das matter werdende negative Glimmlicht übergeht, welches durch den dunklen Raum von dem Anodenlicht getrennt bleibt. Mit wachsender Verdünnung nimmt die Ausdehnung der dunklen Kathodenschicht und des Glimmlichtes zu, der Querschnitt desselben wird grösser, so dass es zuletzt den ganzen unteren Theil der Glocke erfüllt.

475 Fig. 143 giebt nach Eilhard Wiedemann[1]) ein Bild dieser Entladung in einer cylindrischen Röhre bei weitgehender Verdünnung, wo die Kathode *k* eine gegen die Röhrenaxe senkrechte Fläche ist[2]). Die verschiedenen Schichten des Kathodenlichtes haben dabei verschiedene Farben, in Luft der Reihe nach chamois, wasserblau (dunkler) und dann bläulich violett. Das positive geschichtete Licht ist von der Glaswand durch einen je nach der Weite der Röhre bis zu mehreren Millimetern breiten dunklen Raum getrennt.

Fig. 143.

Diese Erscheinungen sind im Allgemeinen schon von Faraday[3]) beobachtet und die Entladungsart mit dem Namen „dunkle Entladung“ bezeichnet worden.

476 Hat sich bei fortgesetzter Verdünnung die dunkle Kathodenschicht verbreitert und ist somit das Glimmlicht weiter gegen die Anode vorgeschoben, so zeigt sich in der Mitte der Kathode ein kleiner Lichtbüschel *l*, welcher bei immer weiter getriebener Verdünnung sich weiter in die dunkle Kathodenschicht *bp* erstreckt, dann sich weiter und weiter in Länge und Breite ausdehnt, das Glimmlicht *bp*, welches dabei immer diffuser und unscheinbarer wird, und nachher auch den dunklen Raum *ph* und scheinbar ohne Störung die ganze positive Entladung durchsetzt. Die später zu erwähnenden Versuche mit ausgehöhlten Kathoden lehren, dass diese neuen Theile der negativen Entladung sich im Wesentlichen

---

[1]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 757, 1883*. — [2]) Eine Beschreibung der Entladung siehe namentlich Wüllner, Pogg. Ann. Jubelband, p. 32, 1874*, vergl. auch Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880*; Wied. Ann. 11, p. 832 u. f.*. — [3]) Faraday, Exp. Res. 13, §. 1544, 1835*; vergl. auch Riess, Reibungselek. 2, p. 144 u. f.

in normaler Richtung zur Elektrode (oder schwach kegelförmig erweitert) ausbreiten (vergleiche die vorige Figur). Man nennt sie deshalb „Kathodenstrahlen". Zugleich wird die positive Entladung allmählich dunkler, breitet sich immer weniger aus, bis endlich nur ein kleiner Büschel an der Anode zurückbleibt. Die Kathodenstrahlen erfüllen dann die Röhre mit einem nebelartigen Schein[1]).

477 Bei Anwendung von Flüssigkeiten als Elektroden an Stelle der Metallelektroden erhält man ähnliche Erscheinungen. So verwendet Paalzow[2]) Ωförmige Entladungsröhren, in deren verticale Schenkel concentrirte Schwefelsäure gegossen ist, welche durch kurze, in die unteren Enden derselben eingeschmolzene Platindrähte mit der Elektricitätsquelle communicirt. Die positive Lichterscheinung geht hierbei von der Begrenzungslinie der Flüssigkeitsoberfläche und Glaswand aus und bildet, wie bei Metallelektroden, Schichten bis nahe an die negative Elektrode. Das negative Licht erhebt sich in einigem Abstande von der Kathode in einem schwach conischen, nach oben abnehmend hellen Lichtring, wie die Flamme eines Rundbrenners, welcher mit der Verdünnung sich immer mehr von der Flüssigkeit trennt und länger wird. Bei sehr starker Verdünnung sind die Lichterscheinungen an beiden Elektroden fast gleich. Wird das Rohr geneigt, so geht das positive Licht vom höchsten Punkte der Grenzfläche aus, das negative ist am tiefsten Punkte am hellsten; der Lichtring bleibt indess der Röhrenwand parallel.

2. Ausbreitung der negativen Entladung.

478 Wir betrachten nach einander die Ausbreitung der einzelnen Theile der negativen Entladung.

Viele Versuche haben bewiesen, dass die negative Entladung innerhalb weiter Grenzen bei sehr niedrigem Druck von der positiven Ent-

---

[1]) Die hier erwähnten einzelnen Theile der Entladung, welche bei verminderten Drucke nach einander auftreten, sind bei den früheren Beschreibungen sehr häufig nicht klar von einander getrennt worden, weshalb in den folgenden Mittheilungen, ungeachtet aller Mühe, die Phänomene möglichst aus einander zu halten, Irrthümer kaum ganz zu vermeiden waren. Die specielleren Verhältnisse der Ausbreitung der positiven und negativen Entladung sind zuerst grundlegend von Hittorf (Pogg. Ann. 136, p. 197, 1869*) studirt worden. — In dem vorliegenden Gebiete ist eine sehr grosse Zahl von Experimenten angestellt und unter mannigfachen complicirenden Abänderungen der Grunderscheinungen zuweilen mit grosser Umständlichkeit beschrieben worden; zum Theil auch ohne den Versuch einer verbindenden Erklärung, so dass ein vollständiger Ueberblick darüber in hohem Grade erschwert ist. In Folge dessen sind nicht selten die gleichen Beobachtungen, event. mit kleinen Abänderungen, unabhängig von einander wiederholt von verschiedenen Forschern publicirt worden. Diesem Grunde möge es zugeschrieben werden, wenn etwa im Folgenden in der grossen Fülle von Varianten die einzelnen Versuche nicht alle besonders hervorgehoben oder, trotz aller Sorgfalt, einmal nicht dem ersten Beobachter zugeschrieben worden sind. — [2]) Paalzow, Wied. Ann. 7, p. 130, 1879*.

ladung nahezu unabhängig ist, so dass die einzelnen Theile der ersteren scheinbar ungestört die Schichten der letzteren durchdringen können. Deshalb bringt man zweckmässig bei dem Studium der negativen Entladung die Anode in Form eines kleinen, durch die Glaswand hindurch in den Entladungsraum gehenden Drahtes in der Nähe der Kathode an, wobei die negative Entladung sich ebenso ausbreitet, als läge die Anode an einer anderen Stelle.

1) Die Lichthülle, welche die Kathode direct umgiebt, in der häufig kleine Fünkchen auftreten, concentrirt sich bei grösserer Verdünnung immer mehr auf einen Punkt, von welchem dann auch die Kathodenstrahlen ausgehen (siehe oben). Als ein Theil der letzteren wird dieser Punkt bei sehr grosser Verdünnung mit ihnen immer dunkler.

479 2) Der dunkle Kathodenraum wird, wie schon erwähnt, mit abnehmendem Druck immer dicker, wie man namentlich gut beobachten kann, wenn man in einem eiförmigen evacuirten Glasgefäss einer positiven spitzen Metallelektrode eine kleine Metallplatte als negative Elektrode conaxial gegenüberstellt, Fig. 144[1]).

Fig. 144.

Die Figuren 145 bis 147 stellen die Erscheinung bei wachsender Verdünnung von 20 mm bis 0,078 mm Quecksilberdruck dar. Endlich tritt bei weiterer Entwickelung der Kathodenstrahlen der dunkle Raum, durch den dieselben hindurchgehen, mehr und mehr zurück.

Fig. 145. Fig. 146. Fig. 147.

480 Mit Annäherung der negativen Platte an die positive Elektrode, indem man den dieselbe tragenden Stab in der ihn umgebenden, einen Draht als Elektrode enthaltenden Glasröhre verschiebbar macht und den Stab mit der Platte nach Crookes (l. c.) durch Neigen und Klopfen des

1) Crookes, Phil. Trans. 1879, pt. 2, p. 135, 641 u. f.*

Apparates vor- und zurückschiebt; oder die Anode an einem in Quecksilber schwimmenden Draht befestigt und durch Zugiessen gegen die Kathode vortreten lässt[1]), ändert sich die Ausdehnung der dunklen Kathodenschicht nicht[2]).

Ebenso wenig ändert sie sich mit wachsender elektromotorischer Kraft des zur Erzeugung der Entladung etwa verwendeten Inductionsstromes.

Wird die eine Hälfte der Kathodenplatte mit Lampenruss geschwärzt, so wird nach Crookes auf dieser Hälfte der dunkle Raum bei verschiedenen Verdünnungen 1,5 mal dicker als auf der rein metallischen. Wird die negative Elektrode aus einer Platindrahtspirale hergestellt, welche durch einen galvanischen Strom zum Glühen erhitzt wird, so wächst die Dicke des dunklen Raumes[3]). 481

Beim Füllen des Rohres mit Wasserstoff ist bei gleichem Druck der dunkle Raum grösser, mit Kohlensäure kleiner als mit Luft; auch erscheint er bei abnehmendem Druck in ersterem früher, als in letzterem.

Die Ausbreitung des Glimmlichtes, zunächst bei nicht allzu niederen Drucken, ergiebt sich aus Versuchen von Hittorf[4]). 482

Er verwendete cylindrische Entladungsröhren, an deren Enden engere Röhren conaxial angesetzt waren, in welche als Elektroden Drähte (meist aus Aluminium), ebenfalls in der Richtung der Axe der Entladungsröhre, mittelst guten Siegellacks auf eine längere Strecke eingekittet waren, so jedoch, dass das negative Licht letzteren nicht erreichte. Die Röhren wurden mittelst einer Quecksilberpumpe evacuirt.

Bei grösserer Dichte der Luft glimmt gewöhnlich bei Anwendung einer in der Axe einer Geissler'schen Röhre befindlichen, negativen Drahtelektrode nur der vordere Theil derselben; bei weiterer Verdünnung breitet sich aber das Glimmen weiter nach hinten aus.

Das Glimmlicht erfüllt ferner einen um so weiteren Raum um die negative Elektrode, je dünner die Luft ist, und je kleiner die Oberfläche der Elektrode ist. Schaltet man in denselben Inductionskreis hinter einander zwei gleiche cylindrische Röhren ein, welche beide mit der Pumpe verbunden sind, deren eine eine lange, deren andere eine kurze negative Elektrode enthält, und verdünnt die Luft, bis die ganzen negativen Elektroden von Glimmlicht überzogen sind, so erscheint die kleinere mit einer dickeren Hülle von Glimmlicht bedeckt. Vermindert man die freie Oberfläche der einen Elektrode weiter, indem man sie allmählich in das sie umhüllende Capillarrohr hineinzieht, so breitet sich das Licht

---

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 764, 1883*. — [2]) Hittorf, l. c. auch Goldstein, Untersuchungen über die elektrische Entladung in Gasen. I. Eine neue Art elektrischer Abstossung. Berlin, Springer, 1880*; Beibl. 4, p. 822*. — [3]) Dies ist auch von Faye, Annuaire du Bureau des longitudes, 1883, p. 717*; Beibl. 7, p. 324*, beobachtet worden. — [4]) Hittorf, Pogg. Ann. 136, p. 197, 1869*.

immer mehr aus. Ist die negative Elektrode auf einen Punkt reducirt, so bildet es eine schöne Halbkugel, die bei Abnahme des Druckes allmählich den dunklen Trennungsraum verdrängt und bis zu dem positiven Licht hervortritt (wobei wohl Kathodenstrahlen mitwirken).

483 Jeder feste und flüssige, gut- oder schlechtleitende Körper, der sich vor der negativen Elektrode befindet, schneidet nach Hittorf (l. c.) das Glimmlicht scharf ab. Ist z. B. ein gerades cylindrisches Rohr vor der einen Elektrode in einem rechten Winkel umgebogen, so geht, wenn die Elektrode positiv ist, die positive Entladung wohl um die Biegung herum, ist sie aber negativ, so ist an derselben das Glimmlicht abgeschnitten, so dass es sich gewissermaassen von der Elektrode aus nur in geraden Strahlen fortpflanzt. — Wird die negative Elektrode aus einem bis auf seine Spitze mit Glas umhüllten ⅃förmigen Draht gebildet, welcher sich in der Mitte eines weiteren Rohres befindet und seine Spitze der an dem einen Ende befindlichen positiven Elektrode abwendet, Fig. 148, so breitet sich bei abnehmender

Fig. 148.

Dichte des Gases das Glimmlicht immer weiter in den von der positiven Elektrode abgewendeten Theil des Rohres aus. Bei Vertauschung der Elektroden biegt dagegen das positive Licht sogleich in der Richtung zur negativen Elektrode um. Ist hierbei die Entfernung der Elektroden nicht zu gross, so kann sich das negative Licht sogar über die positive Elektrode hinaus ausbreiten. Dasselbe geschieht, wenn die positive Elektrode aus einem langen, unbedeckten Draht gebildet ist, der in der Axe des Rohres der kürzeren negativen Elektrode gegenübersteht.

Verwendet man, wie bei den erwähnten Versuchen, als negative Elektrode einen der Entladungsröhre conaxialen Platindraht, dessen in der Röhre befindliches Ende durch eine kleine Glaskappe isolirt ist, so breitet sich bei gehöriger Verdünnung das negative Glimmlicht gegen die Wände des Rohres nur so weit aus, als die freie Oberfläche des Drahtes reicht, wie wenn die Entladung sich nur in den auf der Oberfläche des Drahtes senkrechten Richtungen fortpflanzte, und das Glas phosphorescirt an den getroffenen Stellen[1]).

[1]) Auch hier können bei starken Verdünnungen Kathodenstrahlen mitwirken.

Liegt der Draht excentrisch, so ist die Phosphorescenz an der ihm nächst gelegenen Stelle der Wand (auch wohl in Folge der Kathodenstrahlen) am stärksten [1]).

484 Je kleiner der Raum ist, welcher die negative Elektrode umgiebt, um so weniger erscheint das Glimmlicht; so z. B. erlischt es, wenn man den unter dem Glimmlicht glühenden negativen Draht mit einem Glasfaden berührt und der Draht sich mit geschmolzenem Glase bedeckt, oder wenn man ihn mit einem engeren, vorn offenen Glasröhrchen umgiebt, durch welches gleichzeitig der Absatz des Metalls auf der Glasröhre aufgehoben wird.

485 Der Einfluss der Ausdehnung des Raumes an der negativen Elektrode zeigt sich nach Hittorf (l. c.) sehr deutlich, wenn man die eine Elektrode *a* in den Hals, die andere *c* in die Kugel eines Kolbens einsetzt,

Fig. 149.

a

c

so dass ihre Längsaxen in einer geraden Linie liegen. Ist der Draht in der Kugel negativ, so glimmt er in seiner ganzen Länge; ist der Draht in dem Halse negativ, so geht das Glimmlicht (resp. die Kathodenstrahlen) nur von seinem Ende aus, verbreitet sich in einem Kegel bis in die Kugel, und endet an der die Anode umgebenden Glaswand in einem phosphorescirenden Kreise. Bei Einfügung eines Funkenmikrometers in eine Parallelschliessung zur Röhre gehen darin bei einem grösseren Abstande seiner Kugeln Funken über, wenn die Kathode in der engen Röhre liegt, so dass dieselbe der Entladung scheinbar einen grösseren Widerstand darbietet (richtiger die zur Entladung erforderliche Dichtigkeit auf der Kathode grösser ist).

Ragt bei den letzten Versuchen die in der Kugel des Kolbens (Fig. 149) befindliche Elektrode bis in den Hals desselben hinein, oder nur nahe bis an denselben, und dient sie als Kathode, so dehnt sich bei abnehmendem Druck zuerst das Glimmlicht über die ganze Kathode aus und erfüllt auch die weitere Kugel. Bei stärkerer Verdünnung verhält sich das Glimmlicht aber, wie wenn die Kathode ganz von dem engeren Rohr umgeben wäre, es geht nur von ihrem Ende aus.

[1]) Goldstein, Untersuchungen etc.; Beibl. 4, p. 822*.

486 Da wo das negative Glimmlicht die Röhrenwände trifft, phosphoresciren sie, je nach der Natur des Glases in verschiedenen Farben, bei Kaliglas in bläulichem, bei Uranglas in hellem, schön grünlichem Licht [1]).

Wird eine phosphorescenzfähige Platte einer plattenförmigen Kathode schräg gegenübergestellt, so dass sie halb in die dunkle Kathodenschicht, halb in die zweite helle Kathodenschicht hineinragt, so ändert sich ihre Helligkeit doch stetig; eine Grenze an der Stelle, wo die dunkle und helle Schicht auf sie auftreffen, existirt nicht [2]). Dies rührt indess wohl davon her, dass hierbei schon Kathodenstrahlen durch die dunkle Schicht hindurchgingen.

487 Die Ausbreitung der Kathodenstrahlen, normal zur Kathodenoberfläche, haben wir schon §. 476 erwähnt. Dieselbe lässt sich sehr gut durch ihre Eigenschaft studiren, in hohem Grade an ihren Enden Phosphorescenz zu erregen. Wie an den Grenzen des Glimmlichtes ist dieses Phosphorescenzlicht dasselbe, welches die Körper auch nach der Insolation ausstrahlen, es hat also mit der eigentlichen Entladung als solcher nichts zu thun.

Dieses Phosphoresciren überdauert den Durchgang des Stromes, analog wie bei der Insolation die Bestrahlung [3]).

488 Genauere Angaben über das hierbei von einigen Körpern ausgegebene Phosphorescenzlicht sind von Crookes [4]) gemacht. Diamanten phosphoresciren sehr hell weisslich und zeigen in vielen Fällen helle Linien bei den Wellenlängen $\lambda = 537$, 513 und 503. Chemisch reine Thonerde, durch Fällen mit Ammoniak aus Alaun erhalten, giebt ein rubinrothes, fast nur auf eine Linie von der Wellenlänge $\lambda = 689{,}5$ beschränktes Licht, ähnlich wie im Phosphoroskop. Durch Glühen von Aluminiumacetat erhaltene Thonerde phosphorescirt grün. Spinell giebt ebenfalls eine rothe Linie. Erbinerde giebt eine gelbe Phosphorescenz mit zwei dunklen Banden von den Wellenlängen $\lambda = 520$ und 523. Spodumen phosphorescirt goldgelb, Beryllerde und Phenakit hellblau ohne leuchtende Linie, Yttererde dunkelgrün, Lanthanoxydul erst nach dem Glühen vor dem Löthrohr schön braun, Titansäure dunkelbraun, Magnesia violett, Barythydrat hell orangegelb, Strontian schön tiefblau, Kalk schön orangegelb, kohlensaurer Kalk hellgelb, phosphorsaurer Kalk orangegelb, zuweilen mit einem gelbgrünen Streifen, Kaliumcarbonat schwach blau, Soda schwach gelb, Lithiumcarbonat schwach roth. Bei den beiden letzteren zeigen sich die gewöhnlichen Spectrallinien der Metalldämpfe. Bleiglas

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 117*. Wied. Ann. 11, p. 832, 1880*. — [2]) Entgegen Crookes l. c., p. 641, welcher nur in der die dunkle Kathodenschicht umgebenden leuchtenden Schicht Phosphorescenz fand. — [3]) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 284*. — [4]) Crookes, l. c.; Beibl. 5, p. 512*.

phosphorescirt bläulich, das gewöhnliche Glas grün. Nicht oder kaum phosphoresciren Thorerde und Didymoxyd, Beryll, Quarz, Phenakit, Turmalin, Andalusit u. s. f.

Besonders stark phosphoresciren ferner die auch sonst bekannten Phosphore aus Schwefelcalcium, -barium, -strontium. Bei Temperaturen über der Siedehitze des Schwefels phosphorescirt indess das Schwefelcalcium nur kurze Zeit, bei höherer Temperatur nicht mehr [1]).

Platindoppelcyanüre, Magnesium-, Calciumplatincyanür leuchten hell mit den auch bei der Insolation beobachteten Farben [2]).

Durch Aenderung des Wassergehalts zeigen sich oft secundäre Aenderungen der Lichterscheinungen [3]).

489 Zur Anstellung dieser Versuche bedient sich Crookes des Apparats Fig. 150, in welchem bei gehöriger Verdünnung die von der Kathode N ausgehenden Strahlen die unten befindlichen Substanzen treffen.

Fig. 150.

Mit Kreide bestrichene Papierschirme dienen sehr gut zur Beobachtung des Weges der Kathodenstrahlen. Zweckmässig schliesst man zum Einbringen derselben etc. die Entladungsröhren einerseits durch einen innen mit geschmolzenem, geschwefelten Kautschuk überzogenen Kautschukstöpsel, durch welchen Drähte gesteckt werden, an denen die Elektroden, die Papierschirme u. s. f. befestigt werden [4]).

490 Smaragd leuchtet roth, das Licht ist nach Maskelyne [5]) senkrecht zur Axe polarisirt; Saphir blau, mit gleicher Polarisationsrichtung des Lichts; in beiden Fällen entspricht also das ausgegebene Licht den ausserordentlichen Strahlen. Zinnstein leuchtet gelb, wobei die Polarisationsrichtung parallel der Krystallaxe ist, das Licht also dem ordentlichen

---

1) Hittorf, Wied. Ann. 7, p. 587, 1879*. — 2) Goldstein, Wien. Ber. 80 [2], p. 151, 1879*. — 3) Auch E. Wiedemann, Wied. Ann. 9, p. 157, 1880*. Ein Verzeichniss der phosphorescirenden und nichtphosphorescirenden Körper von Stürtz, Wied. Ann. 8, p. 528, 1879*. — 4) Goldstein, l. c. — 5) Siehe Crookes, l. c., p. 661, auch Beibl. 3, p. 527*.

Strahle entspricht. Bei Hyacinth erscheint bei zwei auf einander senkrechten Richtungen des analysirenden Nicol'schen Prismas der ordentliche Strahl röthlich, der ausserordentliche lavendelblau. — Bei den Platindoppelcyanüren beobachtet man nach E. Wiedemann [1]) eine dichroitische Phosphorescenz erst, wenn ihre äussersten Oberflächen in Folge der Erwärmung durch die Kathodenstrahlen entwässert werden, indem dann die inneren Theile phosphoresciren und das von ihnen kommende Licht von der Oberflächenschicht verändert wird.

Bei anderen Krystallen, neben Diamant auch Beryll, Quarz, Phenakit, Turmalin, Andalusit, Apatit, Topas, Chrysoberyll, Granat u. s. f. zeigt sich keine Polarisation.

Von der Art der Entladung und der Natur des Gases ist die Farbe des Phosphorescenzlichtes unabhängig [2]).

Mit wachsender Verdünnung des Gases in den Röhren nimmt die Helligkeit der Kathodenstrahlen ab, die Helligkeit der Phosphorescenz aber zu [2]). In Wasserstoff erscheint dieselbe schon bei geringeren Verdünnungen, als in der Luft.

Bedeckt man die Glaswand mit einem lichtempfindlichen Papier, so entsteht an den vorher leuchtenden Stellen ein Bild derselben [2]).

491 Dass das hier betrachtete Leuchten in der That ein Phosphoresciren ist, zeigt seine längere Dauer, wie bei der Insolation [3]). Lässt man vor einer aus zwei Kugeln und dazwischen geschaltetem Capillarrohr bestehenden Entladungsröhre einen Spiegel um eine dem letzteren parallele Axe rotiren, so erscheinen beim Durchleiten der Ströme der Influenzmaschine oder des Inductoriums die Bilder der positiven Entladung im Capillarrohr scharf und eng begrenzt und vollkommen discontinuirlich, während das Bild der die mit Glimmlicht umgebene Kathode enthaltenden, grün leuchtenden Kugel zu einem langen grünen Streifen ausgezogen ist [3]).

492 Bei länger andauernder Wirkung der Kathodenstrahlen verliert das Glas seine Fähigkeit zu phosphoresciren. Lässt man von einer hohlen halbkugelförmigen Elektrode Kathodenstrahlen auf eine Stelle der Glaswand einer Entladungsröhre fallen und nachher auf dieselbe Stelle von einer gleichzeitig in die Röhre eingeschmolzenen flachen Elektrode, so erscheint daselbst ein von einem hellen Ring umgebener dunkler Fleck.

493 Ebenso wie die Kathodenstrahlen feste Körper zum Phosphoresciren bringen, kann dies auch bei Gasen geschehen. Bringt man in das eine Ende eines Rohres eine flache Kathode und dicht daran eine Anode, zwischen denen die Entladung übergeht, so phosphorescirt durch die das

---

[1]) Eilh. Wiedemann, l. c. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 284*. — [3]) Eilh. Wiedemann, l. c.

ganze Rohr durchziehenden Kathodenstrahlen die der Kathode gegenüber liegende Röhrenwand. Ist nahe derselben etwas Quecksilber im Rohre und wird es durch Erwärmen in Dampf verwandelt, so leuchtet nur der letztere, und zwar an der der Kathode gegenüberliegenden Seite, und nicht das Rohr; er hört auf zu leuchten, wenn die Kathodenstrahlen durch einen Magnet seitlich abgelenkt werden [1]).

494 Wird in der Mitte einer Glasröhre, an deren beiden Enden sich kleine plattenförmige Elektroden befinden, ein Schirm von Uranglas angebracht, und auf die eine Seite desselben ein kleineres, sehr dünnes Blättchen des gleichen Glases, auf die andere ein eben solches Blättchen von grünlichem Glase gelegt, so leuchten, je nachdem die eine oder andere Elektrode negativ ist, bei schwächeren Entladungen nur die dünnen Glasblättchen im Kathodenlicht, und zwar heller als die freien Stellen der Uranglasplatte, nicht die darunter befindlichen Stellen der letzteren, auf welchen die Blättchen ihren Schatten entwerfen. Werden die Blättchen allmählich erhitzt, so werden sie dunkler. Bei stärkeren Entladungen leuchten die freien Theile der Glasplatte stärker [2]).

Auch schon eine nur hunderttausendstel Millimeter dicke Schicht von Collodium genügt, um die Phosphorescenz einer von den Kathodenstrahlen getroffenen, phosphorescenzfähigen Wand zu verhindern [3]).

495 Lässt man die negativen Kathodenstrahlen durch eine Oeffnung in einem Schirm, z. B. ein mit kreisförmigem Ausschnitt versehenes Glimmerblatt oder dergl. m. fallen, wodurch die auf den Schirm treffenden Strahlen zurückgehalten werden (s. w. u.), und nähert man dem hindurchtretenden Bündel von der Seite eine fluorescenzfähige Platte, so leuchtet sie selbst bei grosser Annäherung an das Bündel nicht.

Nur wo die Kathodenstrahlen eine fluorescenzfähige Wand direct schneiden, leuchtet diese letztere [4]).

496 Eine weitere wichtige Eigenschaft der Kathodenstrahlen [wie des Glimmlichtes [5])] ist, dass sie durch jeden, in ihren Weg kommenden, festen oder flüssigen, gut oder schlecht leitenden Körper abgeschnitten werden.

Fig. 151.

c

Ist z. B. ein gerades cylindrisches Rohr Figur 151, vor der einen Elektrode in einen rech-

[1]) H. Hertz, Wied. Ann. **19**, p. 807, 1883. — [2]) Stokes, siehe Crookes, l. c. — [3]) Goldstein, Berl. Monatsber., 22. Jan. 1880, p. 87*; Wied. Ann. **11**, p. 832*. — [4]) Goldstein, Berl. Monatsber., 22. Jan. 1880, p. 82*; Wied. Ann. **11**, p. 832, 1880*. — [5]) Hittorf, Pogg. Ann. **136**, p. 8, 1869*.

ten Winkel umgebogen, so geht, wenn die Elektrode positiv ist, die positive Entladung wohl um die Biegung herum, ist sie aber negativ, so ist durch die Biegung das negative Licht scharf begrenzt.

497 Bringt man irgend einen Körper zwischen die von den Kathodenstrahlen getroffene Glaswand und die Kathode, z. B. ein Glimmerblatt, so werden auch dadurch die auf jenen Körper auftreffenden Strahlen abgeschnitten.

Untersucht man hierbei die Intensität des durch die Entladungsröhre geleiteten Stromes durch ein Galvanometer, so bleibt doch nach Eilhard Wiedemann[1]) die Stromintensität völlig ungeändert.

Goldstein[2]) wiederholt diesen Versuch in einer etwas anderen Art. Er bringt in eine cylindrische Entladungsröhre mit plattenförmiger Kathode und seitlich daneben befindlicher kurzer Drahtanode einen einerseits geschlossenen, die Entladungsröhre fast ausfüllenden Glascylinder und schaltet zu derselben ein Funkenmikrometer als Nebenschliessung. Wird der Glascylinder in verschiedene Entfernungen von der Kathode gebracht und dadurch die Ausbreitung der Kathodenstrahlen im Verhältniss von 1 : 30 geändert, so verändert sich die Entfernung der Kugeln des Funkenmikrometers, bei welcher gerade die Entladung von der Röhre auf letzteres übergeht, nicht um 5 Proc.

498 In Folge des Abfangens der Kathodenstrahlen durch irgend einen in ihren Weg gestellten Schirm bleibt die hinter demselben befindliche Glaswand dunkel; auf ihr erscheint ein Schatten des Schirmes.

Fig. 152.

Dieser Versuch lässt sich selbstverständlich mannigfach variiren, wie es auch von Goldstein und später von Crookes geschehen

---

[1]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. **10**, p. 238, 1880*. — [2]) Goldstein, Wied. Ann. **12**, p. 259, 1881*.

ist. Man kann in der Glasröhre ein Kreuz von Glimmer oder von Aluminium an einem kleinen Glascharnier befestigen, die negative Elektrode an dem einen Ende, die positive seitlich anbringen, und nach genügender Verdünnung, wenn die Kathodenstrahlen sich durch die ganze Röhre ausbreiten, durch Drehen der Röhre abwechselnd das Kreuz in ihren Weg bringen oder daraus entfernen. Der Schatten des Kreuzes zeigt sich dann auf der gegenüber liegenden Wand (Fig. 152). Ein in einem Glimmerschirm ausgeschnittenes Kreuz giebt dagegen ein hell leuchtendes Phosphorescenzbild auf dunklem Grunde (Crookes). — Auch kann man die positive Elektrode am Ende der Röhre anbringen und zwischen der Elektrode und dem Glimmerdiaphragma eine Platte von Uranglas befestigen.

Die besten Schatten geben, wie nach der Art der Ausbreitung der Kathodenstrahlen zu erwarten ist, ebene Kathoden, weniger gute spitze Kathoden. Bei ersteren ist dementsprechend der Schatten von gleicher Grösse mit dem Schirm, bei letzteren vergrössert.

Die Schärfe der Schatten ist nach Crookes[1]) von der Stärke des Stromes nahezu unabhängig; nur bei sehr starken Strömen werden sie etwas breiter.

499 Bringt man nach Goldstein[2]) vor eine spitze, oder auch vor eine weiter ausgedehnte flache Kathode einen kleinen Körper, so ist der Schatten desselben auch im letzteren Falle sehr deutlich sichtbar, wenn auch nicht vollkommen scharf auf der gegenüber liegenden Glaswand.

Würde die negative Elektrode in derselben Art, wie ein leuchtender Körper, Licht ausstrahlen, also z. B. glühen, so würde der kleine Körper im letzteren Falle keinen Schatten entwerfen. Auch hierdurch wird wiederholt bewiesen, dass die Kathodenstrahlen nahezu in senkrechter Richtung von der Kathodenfläche ausgehen, die negative Entladung sich aber nicht, wie das Licht, von jedem leuchtenden Punkt aus nach allen Seiten ausbreitet.

500 Lässt man auf phosphorescirenden Substanzen, z. B. Uranglas, Magnesiumplatincyanür, Bariumplatincyanür, salpetersaurem Uran, Glimmer, etwa in einem birnförmigen Glasgefässe, durch einen beliebigen Körper einen Schatten entwerfen und entfernt den Körper nach einiger Zeit, so erscheint in einzelnen Fällen an Stelle des Schattens eine hellere Fläche als die Umgebung (Crookes l. c.)[3]). Dies rührt daher, dass bei längerer Bestrahlung durch die Kathodenstrahlen die Phosphorescenzfähigkeit der erwähnten Körper abnimmt; während bei Kreide sich die gleiche Erscheinung nicht zeigt[4]) (vergl. §. 492).

---

1) Crookes, l. c. p. 149*. — 2) Goldstein, Berl. Monatsber. 4. Mai 1876, p. 219*. — 3) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 284*. — 4) Goldstein, Wien. Ber. 80 [2], p. 152, 1879*.

Oeffnet man den Entladungsapparat und evacuirt ihn wieder von Neuem und lässt ohne den schattenwerfenden Körper die Entladung wie früher hindurch gehen, so erscheint immer noch, wenn auch verwaschen, das helle Bild desselben auf der der negativen Elektrode gegenüber liegenden Glasfläche [1]).

501 Mit der normalen Ausbreitung der Kathodenstrahlen stimmt auch der folgende, von Maxwell vorgeschlagene Versuch von Crookes völlig überein. In eine Glasröhre, Fig. 153, war einerseits eine gegen die Axe geneigte kreisförmige Elektrode *b*, andererseits eine zickzackförmig

Fig. 153.

gebogene Aluminiumelektrode *a* eingesetzt. Vor *b* befand sich ein Glimmerschirm mit einem ausserhalb der Axe der Röhre liegenden Loch *c*. War *b* negativ und die Verdünnung genügend, so wurde die Glaswand der Röhre nur von den durch Loch *c* in normaler Richtung von *b* ausgehenden, resp. etwas divergirenden dunklen Strahlen bei *d* in einer elliptischen Stelle zur Phosphorescenz gebracht; die Strahlen gingen nicht direct zur positiven Elektrode. War *a* negativ, so erschien bei schwacher Verdünnung die Elektrode mit einem ihrer Form entsprechenden zickzackförmigen dunklen Raum umgeben, von dessen vertieften Stellen, entsprechend dem Zusammentreffen der Strahlen von je zwei einander zugeneigten Flächen des Bleches Lichtbüschel ausgingen. Erreichte bei starker Verdünnung die dunkle Kathodenschicht die Glaswand der Röhre, so projicirten sich auf derselben Curven, welche den in normaler Richtung von den einzelnen Flächen des zickzackförmigen Bleches ausgehenden Kathodenstrahlen entsprachen.

502 Wird der Versuch bei sehr starker Verdünnung angestellt, während die schräge Elektrode *b* negativ ist, so wird das Bild auf der Glaswand im ersten Moment statt in *d*, in *e* erzeugt und wandert dann sehr schnell nach *d* hin. Wird der Strom unterbrochen und wieder geschlossen, so erscheint es sofort in *d*. Wird der Strom einmal umgekehrt und dann wieder in der früheren Richtung hindurchgeleitet, so wandert wieder das Bild von *e* nach *d* [2]).

---

[1]) Crookes, l. c. p. 645*. — [2]) Crookes, l. c. p. 646*.

503 Bringt man an dem einen Ende einer Röhre zwei etwas gegeneinander geneigte flache Aluminiumplatten *a* und *b* (Fig. 154) an, an dem anderen die Anode *c*, und vor *a* und *b* einen Schirm von Glimmer mit zwei Löchern *d* und *e*, und legt in die Röhre parallel ihrer Axe eine

Fig. 154.

mit einem phosphorescirenden Pulver bestrichene Platte in gleicher Höhe mit den Löchern *d* und *e*, so verzeichnen, je nachdem man *a* oder *b* als Kathode benutzt, die durch *d* oder *e* gehenden Kathodenstrahlen auf der Platte ihre Wege *df* oder *ef*. Werden aber *a* und *b* zugleich als negative Elektroden verwendet, so weichen die Kathodenstrahlen nach *dg* und *eh* aus einander. Zwei gleichgerichtete Kathodenstrahlen stossen also einander ab [1]).

504 Setzt man neben die aus einem Draht bestehende Kathode noch einen parallelen, nicht mit der Elektricitätsquelle verbundenen Draht, so entwirft er in gewöhnlicher Weise einen Schatten. Wird letzterer Draht aber ebenfalls als Kathode verwendet, so erscheinen auf der phosphorescirenden Glaswand zwei dunkle, scharf umgrenzte, in der Richtung der Drähte liegende oblonge, an den Enden abgerundete durch die Ebene der Drähte halbirte Schatten [2]), „Dunkelflächen", in denen die Kuppen viel dunkler sind, als die zwischen den den Elektroden parallelen Grenzlinien liegenden Stellen. Diese Dunkelflächen sind von einer viel helleren Grenzzone umgeben, als die Umgebung, namentlich an den beiden Geraden und abnehmend bis zum Ende der Abrundung. Dabei sind die Abrundungen an den nicht eingeschmolzenen Kathodenenden schärfer gezeichnet.

Fig. 155.

Die Lage der Anode hat auch hier keinen Einfluss; ebensowenig der Stoff der Kathode, wenn sie während des Versuchs unverändert bleibt.

Ebenso wie zwei getrennte Drahtkathoden verhält sich eine U förmige Kathode; nur erscheint an ihrem gebogenen Ende keine Abrundung der beiden Dunkelflächen.

Sind die beiden Kathoden im rechten Winkel gekreuzt, so ist die Dunkelfläche wie in Fig. 155 gestaltet.

505 Wird über die Enden zweier paralleler Kathoden ein sie nicht berührender Glasconus geschoben, so sind die Dunkelflächen an der Spitze

---

[1]) Crookes, l. c. p. 653*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 285*; Untersuchungen etc.; Beibl. 4, p. 822*.

abgerundete Dreiecke. Stehen die Elektroden unsymmetrisch zur Röhrenaxe, indem man sie mit einem Glasring umgiebt, welcher in der cylindrischen Entladungsröhre rollen kann, so ist der Schatten an der von der einen Elektrode entfernteren Wand breiter, an der der anderen näheren schmaler und schärfer.

Bleibt der Abstand beider Kathoden von der Wand der gleiche, so verbreitern sich bei ihrer Annäherung an einander die Schatten, indess relativ nur wenig. War z. B. in einem 45 mm weiten Cylinder die Kathode *a* in der Axe, *b* excentrisch in einem Schliff eingesetzt, so betrug die relative Breite *B* der Dunkelfläche von *b* bei den Abständen *A* der Elektroden

A	23	15	9	8	5	3,5	2	0,67 mm
B	30	31	33	34	36	45	60	73

In einer Kugel entwerfen zwei parallele Kathoden Schatten, welche als Durchschnittsfiguren der Kugel mit den Linien anzusehen sind, welche von den Elektroden zu den auf einer umgebenden Cylinderfläche beschriebenen Schatten gezogen werden.

Die Länge und Breite der Dunkelfläche nimmt mit der Dicke der ihr benachbarten Elektrode zu.

506 Ist die eine der einander parallelen Elektroden tordirt, welche für sich ein von hellen und dunklen Schraubenlinien durchzogenes Phosphorescenzlicht erzeugen würde (s. w. u.), so ist nur die ihr zunächst liegende Dunkelfläche ebenfalls von solchen Spiralen durchzogen.

Wendet man zwei zu einander senkrechte tordirte Drähte als Kathoden an, so fehlen in der einen Dunkelfläche die einen, in der anderen die zu diesen senkrechten Spirallinien.

507 Ein genaueres Studium der Dunkelflächen durch Goldstein[1]) zeigt, dass dieselben zwar vergrösserten Schatten der Elektroden ähnlich sind, indess doch davon Abweichungen zeigen, wie wenn die von jeder Kathode kommenden Strahlen von der anderen abgestossen würden. Goldstein bezeichnet diese Erscheinungen mit dem Namen der Deflexion der Kathodenstrahlen. Man kann dies zunächst bei parallelen Elektroden beobachten, wenn man zwischen sie einen Blechschirm mit rechteckigen Löchern bringt. Ist nur die eine Elektrode *a* mit dem negativen Pol verbunden, so erscheinen zur Seite der nicht verbundenen Elektrode *b* auf dem Glase helle Bilder der Oeffnungen, welche von dem schwarzen Schatten der Elektrode *b* durchzogen sind. Wird aber *b* ebenfalls mit dem negativen Pol verbunden, so entfernen sich die hellen Bilder von einander; zwischen ihnen bleibt ein breiterer dunkler Streifen.

---

[1]) Goldstein, l. c.; ebenso für die Versuche §. 508 bis 516.

Noch besser erkennt man dies, wenn man einen kurzen metallenen Hohlcylinder, Fig. 156, dessen Axe der der Entladungsröhre parallel ist, als Kathode verwendet. Aus demselben tritt ein schmaler heller, dem Cylinder conaxialer Kegel von Kathodenstrahlen aus. Bringt man in die Nähe derselben einen gegen seine Axe normalen Draht *b* als zweite Kathode, so biegt sich der Strahlenkegel von ihm ab, und zwar nicht nur an der dem Draht zugekehrten Seite; so dass sich also die Abstossung auch auf die entfernteren Strahlen erstreckt. Hierbei drängen nicht allein die der ablenkenden Kathode *b* zunächst liegenden abgebogenen Strahlen die ferneren zurück, denn wenn man mittelst eines Diaphragmas nur diese letzteren bis in die Nähe von *b* gelangen lässt, so werden sie ebenso abgelenkt, wie im ganzen Strahlenbüschel.

Fig. 156.

Jenseits der Knickung verlaufen die Kathodenstrahlen wieder geradlinig, wie man an der Erregung von Phosphorescenz an gegenüber gestellten Körpern beobachten kann.

508 Während im vorliegenden Fall die Ablenkungen der Kathodenstrahlen normal zu den Elementen der zweiten linearen Kathode stattfinden, ergeben die folgenden Versuche von Goldstein (l. c.), dass sie daneben auch nach allen Seiten von den Randelementen der Kathoden zerstreut werden können. In ein cylindrisches Rohr werden parallel der Axe zwei Drähte als Kathoden eingesetzt, ein dünnerer und ein dickerer, bis zu seinem eben geschliffenen Ende mit Glas bedeckter. Der letzterem zunächst liegende Dunkelraum hat dann die Gestalt Fig. 157. Die Strahlen werden also von demselben nach allen Richtungen, auch tangential zur Oberfläche abgestossen.

Die Krümmung der ablenkenden Kathode hat hier keinen Einfluss. Lässt man einen durch ein Diaphragma ausgeschnittenen Theil eines Strahlenbündels auf die mittleren Theile einer zweiten ebenen Kathode auftreffen, so wird derselbe ebenso wie durch einen Draht abgelenkt. Dass die scharfen Kanten der Kathode nicht die allseitigen Ablenkungen bedingen, erkennt man, wenn man eine Drahtkathode an einzelnen Stellen mit Glas bedeckt; die von einer parallelen gewöhnlichen zweiten Kathode entworfenen Dunkelflächen der ersteren zeigen dann dieselben oben und unten abgerundeten Dunkelflächen wie in Fig. 157.

Fig. 157.

509 Mit wachsender Entfernung der Strahlen von der ablenkenden Kathode nimmt die Ablenkung ab. Strahlenbündel von einer der Röhrenaxe parallelen Blechkathode *a* gingen durch ein Blechdiaphragma bei einer senkrecht zur Röhrenaxe gestellten, der Blechkathode parallelen Drahtkathode in den Abständen *e* vorbei. Die Ablenkungen *d* betrugen

e	3	4,5	7	12	16 mm
d	4,5	3,5	1,6	1,5	1

Lässt man daher ein Strahlenbündel von einer auf der Röhrenaxe senkrechten ebenen Elektrode *a* ausgehen und bringt vor derselben eine zweite, gegen die Röhrenaxe senkrechte, bis auf ihr Ende mit Glas umgebene Drahtkathode an, von deren Ende ein Strahlenkegel in senkrechter Richtung zur Röhrenaxe ausstrahlt und schneidet man einen kleinen Theil desselben durch ein Diaphragma ab, so erleidet zwar die von *a* ausgehende Entladung an *b*, nicht aber die von *a* entferntere, von *b* ausgehende Entladung eine Deflexion.

Auch erscheinen die Dunkelflächen in der Richtung der ablenkenden Stellen der Drahtkathode verlängert, so dass also auch der Strahlenkegel in der Richtung parallel zur Kathode nach beiden Seiten verbreitert wird. Diese Verbreiterung ist am grössten für die der Kathode zunächst liegenden Strahlen, am kleinsten in der Mitte, am grössten an beiden Enden.

510 Da die Breite der Dunkelfläche mit der Dicke der ablenkenden Drähte wächst, so nimmt nach Goldstein die Wirkung der Oberflächenelemente mit der Stärke ihrer Neigung gegen den Strahl zu; entsprechend lenkt eine convexe Fläche einen Strahl um so stärker ab, je stärker sie gekrümmt ist.

511 Lenkt man die von einer Kathode ausgehenden Strahlen durch einen äquatorial gegen dieselben gestellten Hufeisenmagnet so ab, dass sie gegen die Kathode zurückgeworfen werden und sie schneiden, so theilen sie sich auch in zwei getrennte Büschel. Es ist dies ein Beweis dafür, dass der Zustand der Kathode eine gewisse Zeit bis zur Rückkehr der Kathodenstrahlen zu derselben andauert.

512 Die Natur der Gase und des Metalls der Kathoden, ihre Länge, die Grösse der Entladungsgefässe ist auf den Ablenkungswinkel ohne Einfluss, z. B. wenn die Elektroden aus Drähten von verschiedenem Material zusammengesetzt sind; ebenso ist es die Art der Elektricitätsquelle (Leydener Flaschen, Influenzmaschinen, Inductorien, vielpaarige Säulen); ebenso auch die Stärke der Entladung bei verschiedenen Inductionsapparaten, vorausgesetzt, dass der Strom sich zwischen den beiden Kathoden gleichmässig vertheilt. Ist letzteres nicht der Fall, so sind, wenn Elektrode *a* direct, *b* durch einen feuchten Faden mit dem Inductorium verbunden ist, die durch *a* von *b* entworfenen Dunkelflächen schmaler und dunkler als bei gleichmässiger Vertheilung des Stromes; umgekehrt die durch *b* von *a* entworfenen grösser und heller. Dabei wird die erst erwähnte Fläche gegen das Ende des abstossenden Drahtes breiter, die letzt erwähnte schmaler. Hieraus folgert Goldstein, dass, je stärker durch ein Ele-

ment einer Kathode die vorbeigehenden Strahlen abgelenkt werden, desto geringer die Fähigkeit der von denselben ausgehenden Strahlen ist, abgelenkt zu werden [1]).

513 Auch nichtleitende elektrische Körper, z. B. ein einer einzelnen Metallkathode genäherter Glasstab, welcher sich negativ ladet, lenken die Kathodenstrahlen ab. Ebenso und aus gleichem Grunde wirkt eine aussen abgeleitete Stelle der Glaswand der Röhre (s. w. u.).

514 Durch feste Körper hindurch wirkt die Abstossung nicht. Liegen dagegen neben einander mehrere Strahlen in einer Ebene, welche durch Oeffnungen in einem vor einer ebenen Kathode aufgestellten Diaphragma ausgeschnitten sind, so wird durch eine zweite Drahtkathode der mittlere Strahl in dieser Ebene weniger abgelenkt, als für sich allein (in Folge der gegenseitigen Abstossung der Kathodenstrahlen).

515 Liegt eine Anode neben einer Kathode, so ist der Schatten der ersteren oft schmaler, als sie selbst; indess ist die Wirkung, welche einer Anziehung der Kathodenstrahlen durch die Anode ähnlich sieht, verhältnissmässig klein. Die Ursache ist möglicher Weise eine veränderte Vertheilung der negativen Entladung, welche nach der der Anode abgekehrten Seite hinübergedrängt wird.

516 Der Einfluss der Deflexion der Kathodenstrahlen durch eine zweite Kathode zeigt sich stets, wenn man vor der ersten Kathode einen leitenden, schattenwerfenden Körper anbringt und ihn mit der Kathode durch eine feuchte Schnur verbindet. Dabei erweitert sich der Schatten und rings um den ursprünglichen Schatten erscheint ein Halbschatten.

Wird der schattenwerfende Körper mit der positiven Elektrode verbunden, so zeigt sich kein Halbschatten; der ursprüngliche Schatten bleibt unverändert.

Dies rührt davon her, dass sich auch bei der Isolation der schattenwerfende Körper positiv ladet.

Mit wachsender Verdünnung nimmt die Ausbreitung des Halbschattens ab.

517 Liegen zwei flache Kathoden einander gegenüber, so wird ihre Helligkeit auf ihren einander zugekehrten Seiten verstärkt, auf ihren abgewendeten Seiten vermindert und zugleich die helle Kathodenschicht zwischen ihnen stark verengt.

---

[1]) Goldstein bezeichnet obige Flächen als Makro- und Mikroflächen, das Ablenkungsvermögen der Kathoden und die Fähigkeit der Strahlen abgelenkt zu werden, durch die Namen „deflectorisches“ und „deflexives“ Vermögen, welche beide durch die Ablenkungswinkel der Strahlen an einer Kathode von der Intensität Eins gemessen werden.

So erhält man z. B. bei Anwendung einer kurzen, 0,75 cm weiten Blechröhre als Kathode sehr helles, für Spectralbeobachtungen geeignetes Licht[1]).

518 Wird eine phosphorescirende Substanz, auf welche die Kathodenstrahlen fallen, z. B. Kreide, auf einer Metallplatte *B* ausgebreitet und dieselbe mit der Kathode selbst verbunden, so dass sie ebenfalls als Kathode dient, so erlischt die Phosphorescenz. Dabei ist die Gesammtintensität der Entladung gleichgültig, so dass bei gleichbleibendem Dichtigkeitsverhältniss auf den Elektroden die Dichtigkeit der Entladung selbst ohne Einfluss ist. Wird aber *B* mit *A* durch eine feuchte Schnur, *A* direct mit dem Inductorium verbunden, so schwindet die Phosphorescenz um so mehr, je kleinere Elektricitätsmengen zu *B* gelangen.

Wird die Fläche *B* zur Anode gemacht, so ändert sich die Phosphorescenz nicht[2]).

519 Eine Consequenz der geradlinigen Ausbreitung der Kathodenstrahlen von den Elektroden aus, wobei freilich die Abstossung derselben etwas mitwirken kann, ist, dass nach Crookes[3]) bei Anwendung einer nahezu halbkugelförmigen negativen Elektrode die Entladung bei wachsender Verdünnung nach einander die Fig. 158 gezeichneten Gestalten

Fig. 158.

annimmt. Eine Anzahl der Strahlen convergirt also von der Elektrode zu einem Brennpunkt, über welchen hinaus sie wieder divergiren.

520 Bringt man in einer weiten Glasröhre als negative Elektrode einen Halbcylinder von Aluminium von 22 mm Durchmesser an und vor demselben in der Axe eine getheilte Glasscala, und an beliebigen Stellen der Röhrenwand einen kurzen Draht als Anode, so convergiren bei einem Druck von $106 . 10^{-6}$ Atm. die bläulichen Kathodenstrahlen gegen den

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 295*. — [2]) Goldstein, Wien. Ber. 1880 [2], p. 155. — [3]) Crookes, l. c.

11 mm von dem Halbcylinder entfernten Mittelpunkt; bei weiterer Verdünnung kreuzen sich die Randstrahlen, der Brennpunkt dehnt sich in die Länge, rückt bei $19{,}3 \,.\, 10^{-6}$ Atm. bis zu 19 mm vor und wird wenig scharf definirt, wie wenn die Strahlen von der Mitte des Halbcylinders sich weiter ausbreiteten als die Randstrahlen. Zugleich zeigt sich bei den niederen Drucken bei 11 mm Entfernung ein schwaches grünes Phosphorescenzlicht auf der Scala selbst. Fig. 159 zeigt die Erscheinung ohne Scala bei einem Druck von 10^{-6} Atm. (Aehnliche Erscheinungen zeigen sich bei Anwendung einer vielpaarigen Chlorsilberkette.)

Fig. 159.

521 Indess ist der senkrechte Austritt bei diesen Versuchen nicht streng vorhanden; bei einer Hohlspiegelkathode von 21,5 mm Oeffnung und 12,5 mm Krümmungsradius entsteht nach Goldstein[1]) bei 0,17 cm Druck kein Brennpunkt, sondern eine Brennfläche von 4 mm Durchmesser. Werden Funkenstrecken in die Stromesbahn eingeschaltet, so steigt der Durchmesser mit Verlängerung derselben bis auf 1 cm. Mit abnehmendem Druck sinkt der Durchmesser der Fläche und auch die durch Einschaltung von Funkenstrecken zu erzielende Maximalausdehnung derselben.

Zugleich nimmt die Helligkeit der Fläche vom Centrum zur Peripherie sehr wenig, an letzterer aber plötzlich sehr schnell ab.

Ist der Hohlspiegel am Rande etwas gezackt, so sieht man diese Zacken auch entsprechend der Grösse der Brennfläche an dem Rande derselben reproducirt.

522 Concave, in Form von Hohlspiegeln hergestellte Kathoden von verschiedener Form, welche zunächst im Abstande ihres Kugeldurchmessers

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 117*.

von der Wand einer 8 bis 10 cm im Durchmesser haltenden Kugel befestigt werden, geben eigenthümlich gestaltete Figuren, welche ebenfalls nicht der Annahme von Crookes entsprechen, dass von allen Punkten der Kathoden die Strahlen normal ausgehen. So erscheinen nach Goldstein[1]) bei einem quadratischen Hohlspiegel, Fig. 160, von 40 mm Kugeldurchmesser mit immer wachsender Verdünnung bis zu 0,01 mm Quecksilberdruck nach einander die Fig. 161 bis 166 gezeichneten Gestalten, also zuerst das directe Abbild der Kathode in gleicher Grösse, und dann diagonale Linien, denen strahlige und sich verbreiternde dreieckartige Ausbreitungen von den Kanten aus folgen. Aehnlich verhalten sich dreieckige Kathoden u. s. f.

Fig. 160.

Fig. 161. Fig. 162. Fig. 163.

Fig. 164. Fig. 165. Fig. 166.

Fig. 167. Fig. 168. Fig. 169. Fig. 170.

Fig. 171. Fig. 172.

Fig. 173. Fig. 174.

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 7. Juli 1881, p. 781*; Wied. Ann. 15, p. 246, 254, 1882*.

Eine kreuzförmige Kathode, Fig. 167, giebt nach einander die Fig. 168 bis 172 gezeichneten Bilder. — Wie bei der ersten Figur bei starker Verdünnung die Axen des Bildes den Seiten des Quadrates entsprechen, so ist ganz analog das Bild, Fig. 174, eines dreieckigen Sterns, Fig. 173, gegen die Kathode um 60°, das eines fünfseitigen um 36° gedreht. Dabei zeigen sich auf der Glaskugel noch Verlängerungen des Lichtkernes der Hauptfigur und der Sternstrahlen.

Statt die Gasdichte abnehmen zu lassen, kann man auch den Abstand der Kathoden von der Glaswand verkleinern und erhält dieselbe Reihenfolge von Bildern, so dass sie volle Querschnitte des Bündels der Kathodenstrahlen sind, welche nur bei verminderter Gasdichte weiter von der Kathode fort und aus einander rücken. 523

Eine Verstärkung der Krümmung der Elektroden wirkt cet. par. wie eine Vergrösserung der Wanddistanz oder der Gasdichte. Aehnlich wirkt eine Vergrösserung der Elektrode ohne Aenderung der Krümmung u. s. f., so dass z. B. bei grossen quadratischen Elektroden nur die ersten Bilder der Reihe bei gesteigerter Verdünnung zu erhalten sind.

Aehnliche Erscheinungen, die sich mannigfaltig variiren lassen, ergeben sich bei cylindrischen Elektroden u. s. f.

Blendet man durch einen Schirm zwischen der Kathode, z. B. einem Kreuze, und ihrem Kugelmittelpunkte, die vom unteren Theile kommenden Strahlen ab, so fehlen bei höheren Drucken im Bilde die oberen Theile, so dass die Strahlen sich jedenfalls kreuzen. 524

Dagegen verschwindet bei starken Verdünnungen bei Verdeckung der oberen Hälfte einer quadratischen Kathode auch der obere Theil des Bildes, so dass dann also bei gleichem Abstande der Wand die Strahlen sich noch nicht gekreuzt haben.

Noch complicirter gestalten sich die Bilder ebener Kathoden, z. B. die eines Quadrates, Fig. 175, eines Rechtecks, Fig. 176, einer Ellipse, Fig. 177. Eine Kreisscheibe giebt nur ein kreisförmiges, aussen helleres 525

Fig. 175. Quadrat

Fig. 176. Rechteck

Fig. 177. Ellipse

Bild. Mit wachsender Verdünnung tritt in den Bildern der Untergrund weiter nach aussen.

Aus Drähten zusammengesetzte Elektroden geben ebenfalls complicirte Bilder, so ein Drahtfünfeck, Fig. 178, die Fig. 179.

Fig. 178. Fig. 179.

Eine quadratische Platte mit 16 regelmässig parallel den Kanten vertheilten Löchern giebt 16 helle Lichtmaxima an den ihnen entsprechenden Stellen.

Selbstverständlich kann man diese Versuche beliebig variiren, ohne indess davon weitere Aufklärungen erwarten zu dürfen, welche die einfachsten Fälle nicht geben. Jedenfalls sind die Erscheinungen sehr complicirt, da bei langsamer Elektricitätszufuhr die verschiedenen Stellen der Elektroden je nach ihrer Krümmung früher oder später auf die zu einer Entladung erforderliche Dichtigkeit geladen werden und so an einzelnen Stellen die Entladung eher beginnt als an anderen. Dabei kann die Ladung der Glaswand vom allerwesentlichsten Einflusse sein.

526 Die hellen Bogen in den Bildern kreuzförmiger Kathoden, z. B. in Fig. 170 u. f., können sich nach Goldstein dadurch erklären, dass die von den Schenkeln derselben ausgehenden Strahlen von denen der benachbarten Schenkel eine Abstossung erleiden. In der That, schiebt man zwischen zwei Schenkel eines Kreuzes einen im Winkel von 45° gegen dieselben geneigten isolirten Schirm, so entstehen die Bogen nicht, sondern der entsprechende Theil des Bildraumes ist nur einförmig von der Mitte gegen die Peripherie hin abnehmend erleuchtet resp. ganz dunkel, wenn der Schirm weiter über die Kathodenschenkel hervorragt.

527 Auf denselben Ursachen beruht es, dass, wenn eine Kathode mit einer erhabenen resp. vertieften Zeichnung versehen ist (eine Münze), sich die Zeichnung auf einer von der Kathode einige Centimeter weit entfernten Glaswand abbildet [1]), analog wie schon bei tordirten Drähten kleine unmerkbare Rillen wirken (vergl. §. 506).

528 Ein lichtempfindliches Papier, welches von den von einer Münze ausgehenden Kathodenstrahlen getroffen wird, zeigt eine photographische Abbildung derselben. Wird die Luft im Rohre weniger verdünnt, so dass kein Phosphorescenzbild auf der Glaswand entsteht, so tritt auch diese Wirkung nicht ein.

529 Legt man eine äussere Ableitung an die Stelle der Glaswand, welche durch die Kathodenstrahlen phosphorescirt, so sammelt sich an dersel-

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 1876, p. 286*.

ben negative Elektricität an, sie wird also selbst zur negativen Elektrode und die Phosphorescenz erlischt dadurch[1]).

530 Lässt man in einem aus zwei durch eine engere gebogene Röhre verbundenen Cylindern B und C_1, Fig. 180, bestehenden Entladungsrohre von einer ebenen Kathode k die Strahlen austreten, so dass sie an der Biegung x Phosphorescenz erregen, so erscheint auch in der Mitte von C_1 in d_1 ein leuchtender Fleck, wie Eilhard Wiedemann[2]) zuerst beobachtet hat. Die Annahme, dass dies in Folge einer Ablenkung der Kathodenstrahlen durch die secundär negativ elektrische Fläche x geschieht, wird nach Goldstein[3]) dadurch widerlegt, dass auch bei Anbringung eines zweiten Ansatzrohres C_2, Fig. 181, die x gegenüber liegende Stelle d_2 desselben zum Leuchten kommt. Vielmehr gehen von der primär von dem Kathodenlicht getroffenen Stelle nach allen Seiten diffus neue Kathodenstrahlen aus, welche die umgebenden Körper zur Phosphorescenz bringen, gleichviel ob obige Stelle dabei phosphorescirt oder nicht. Zum Beweise hierfür wendet Goldstein eine Röhre von der Form der Fig. 182 an, in welcher die von k kommenden Kathodenstrahlen einen Fleck f auf einer Platte treffen, welche an einem durch den Kautschukstöpsel A hindurchgehenden Draht befestigt ist. Dabei leuchtet dann die ganze Wand des Röhrentheils C von f an mit abnehmender Stärke und mit dem dem Glase eigenthümlichen Phosphorescenzlicht, gleichviel

Fig. 180.

Fig. 181.

Fig. 182.

ob die Platte f aus grün phosphorescirendem Glase besteht oder mit roth phosphorescirender Kreide überstrichen ist, oder selbst nicht phosphorescirt. Auch kann sie aus Metall bestehen, welches eventuell auch als Anode dienen kann.

Ein Draht zwischen der Platte und der Glaswand giebt wegen der diffusen Reflexion nur dann scharfe Schatten, wenn er nahe der Glaswand liegt.

---

[1]) Goldstein, Wien. Ber. 74 [2], p. 468, 1876*. — [2]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 236, 1880*. — [3]) Goldstein, Berl. Monatsber. 7. Juli 1881, p. 775*; Wied. Ann. 15, p. 246*.

531 Trotz der in den vorigen Paragraphen erwähnten Erscheinung zeigen indess die Kathodenstrahlen für sich keine elektrostatische Wirkungen, wie Hertz[1]) gefunden hat.

An dem einen Ende eines 25 mm weiten, 250 mm langen Glasrohres ist eine kleine kreisförmige Kathode angebracht. Die Anode besteht aus einem die Kathode umgebenden, vor derselben bis auf eine 10 mm weite kreisförmige Oeffnung geschlossenen Metallrohr, vor welchem ein Drahtnetz mit 1 qmm grossen Maschen liegt, durch welches die Kathodenstrahlen hindurchgehen müssen. Das ganze Glasrohr ist von einem metallenen, abgeleiteten Schutzkasten umgeben und dieser mit dem inneren Metallrohr, sowie mit dem Drahtnetz verbunden. Um das der Kathode abgewendete Ende des Glasrohres ist ein Metallmantel gelegt, welcher durch einen isolirt durch den Kasten geführten Draht mit den einen Quadranten eines Elektrometers verbunden ist, während die anderen Quadranten zur Erde abgeleitet sind. Man konnte annehmen, dass die durch das Drahtnetz hindurchgehenden Kathodenstrahlen rein waren. Trotzdem schwankte beim Durchleiten des Stromes eines Inductoriums durch die Elektroden die Nadel des Elektrometers nur um 10 bis 20 Scalentheile hin und her, während ein an Stelle des Glasrohres in den Mantel gebrachter elektrisirter Metallstab bei Verbindung mit der Kathode sehr grosse Ausschläge verursachte. Die Kathodenstrahlen haben demnach keine elektrostatische Wirkung. Wohl aber wird das Glasrohr allmählich dauernd geladen, und diese Ladung bleibt constant bei Erregung oder Unterbrechung des Stromes des Inductoriums; indem durch das Drahtnetz Elektricität auf das Glas übertritt, welche aber mit den Kathodenstrahlen nichts zu thun hat.

532 Auch werden die Kathodenstrahlen durch elektrostatische Kräfte nicht beeinflusst, wie Voller[2]) gezeigt hat. Nähert man den Entladungsröhren geriebene Harz- oder Glasstangen oder elektrisirte Metallkapseln, so werden sie nicht abgelenkt. — Auch Hertz (l. c.) hat dasselbe beobachtet. Wurde in dem eben erwähnten Apparat in den Weg der Kathodenstrahlen ein feiner Draht gebracht, welcher einen scharfen Schatten entwarf, so änderte sich die Lage des letzteren nicht, als die Röhre zwischen zwei stark und entgegengesetzt elektrisirte Platten gebracht wurde. Dasselbe ergab sich, als die Platten durch zwei 120 mm lange, 120 mm von einander entfernte parallele Metallstreifen im Inneren des Rohres ersetzt wurden, zwischen denen die Kathodenstrahlen hindurchgehen mussten, und die Platten durch Verbindung mit den Polen einer Batterie von 20 Daniell'schen Elementen geladen wurden. Auch wenn bei Anwendung einer grösseren Ladungssäule unter Einschaltung eines grösseren Widerstandes zwischen den Platten eine Bogenentladung überging, während das Inductorium mit

---

[1]) Hertz, Wied. Ann. 19, p. 809, 1883*. — [2]) Voller, Ueber die Nichtexistenz strahlender Materie in den Crookes'schen Röhren. Verhandl. des naturw. Vereins von Hamburg-Altona, 1880*.

den Elektroden verbunden war, wurde zwar das Phosphorescenzbild nahe der negativen Platte durch Deflexion etwas verzerrt, der Schatten des Drahtes in der Mitte zwischen den Platten blieb aber unverändert.

3. Ausbreitung des dunklen Raumes und der positiven Entladung.

533 Der dunkle Raum zwischen der positiven und negativen Entladung dehnt sich bei wachsender Verdünnung aus. Je weiter die Röhren sind, desto mehr rückt er gegen die Anode vor und desto weniger weit reicht das positive Licht gegen die Kathode hin.

Durch geeignete Verhältnisse des Entladungsapparates kann der dunkle Raum beliebig ausgedehnt werden; so ist er in einer 30 cm langen Röhre, welche aus einem kurzen, beliebig geformten Theile mit der Kathode und zwei durch enge Canäle communicirenden 6 cm weiten Cylindern besteht, 25 cm lang [1]) (siehe weiter unten).

Auch wenn die Elektroden der Entladungsröhren sehr schlecht leiten, z. B. aus Schwefelantimon oder Holz bestehen, bleibt der dunkle Raum an derselben Stelle [2]).

Bei sehr geringem Druck hat Wächter [3]) an derartigen Kathoden (Holz, Papier) nur einen stets von derselben Stelle ausgehenden Glimmlichtstrahl, nicht aber einen dunklen Raum und auch kein Glimmlicht beobachtet. Beide treten dagegen über concentrirter Schwefelsäure als Kathode auf.

534 Uebrigens ist der dunkle Raum nicht absolut dunkel, da man von ihm (bei Anwendung des Stromes einer Chlorsilberbatterie) Photographien erhalten kann. Nach Schätzungen von Warren de la Rue und Hugo Müller [4]) ist er etwa 840 mal dunkler als die Schichten des positiven Lichtes.

535 Sonst verhält sich der dunkle Raum nicht wie das Kathodenlicht. Biegt man eine cylindrische Röhre mit den Elektroden an den Enden in einem rechten Winkel um, so nimmt er bei gehöriger Verdünnung die ganze Biegung des Rohres ein [5]).

536 Die positive Entladung verhält sich von der negativen sehr verschieden. Setzt man nach Hittorf [6]) die beiden Elektroden in die Enden eines in einem rechten Winkel gebogenen Rohres ein, so dehnen

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 4. Mai 1876, p. 290*. — [2]) Holtz, Berl. Monatsber. 1875, p. 561*. — [3]) Wächter, Wien. Ber. 85, p. 560, 1882*; Wied. Ann. 17, p. 923*. — [4]) Warren de la Rue und Hugo Müller, Proc. Roy. Soc. 34, p. 437, 1883*; Beibl. 7, p. 473*. — [5]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 92*; Wied. Ann. 11, p. 843*. — [6]) Hittorf, Pogg. Ann. 136, p. 1, 197, 1869*.

sich (vergl. §. 496), wenn die Biegung sich dicht vor der negativen Elektrode befindet, die Kathodenstrahlen resp. das Glimmlicht nur bis zur Biegung aus. Befindet sich dieselbe aber vor der positiven Elektrode, so geht die positive Entladung um die Biegung herum. — Hier wie in allen noch zu erwähnenden Fällen bleibt sie von der negativen Entladung durch den dunklen Raum getrennt.

Auch aus dem §. 483 beschriebenen Versuche folgt, dass das positive Licht sich zur negativen Elektrode hinbiegt, während das negative in gerader Richtung normal zu der Kathodenoberfläche sich ausbreitet. Hiernach ist die Ausbreitung des negativen Glimmlichtes von der positiven Entladung bis zu einem gewissen Grade unabhängig.

537 Sehr auffallend zeigt sich das verschiedene Verhalten der Entladungen an den Elektroden, wenn man die eine derselben durch eine ebene Metallfläche von Blech oder Quecksilber ersetzt [1]).

Auf den Teller einer Luftpumpe wurde eine kreisrunde, polirte Metallplatte von 40 mm Durchmesser gelegt, welche durch die Metallröhren der Pumpe mit der Influenzmaschine verbunden werden konnte. Ueber dieselbe wurde eine oben tubulirte Glasglocke von 60 mm Weite und 90 mm Höhe gesetzt, in deren Tubulus ein mit einem Glasrohr bekleideter Metallstab eingesetzt wurde, der etwa 15 mm oberhalb der Metallplatte eine Messingkugel von etwa 3,8 mm Durchmesser trug.

Wurde die Luft in der Glocke bis auf etwa 20 mm Quecksilberdruck evacuirt und die Kugel durch den sie tragenden Stab mit dem negativen, die Metallplatte mit dem positiven Pol der Holtz'schen Maschine verbunden, so leuchtete die Kugel auf ihrer ganzen Oberfläche mit bläulichem Glimmlicht, welches sie in zwei concentrischen, durch eine dunklere Schicht von einander getrennten Kugelschalen umgab. Auf der positiven Platte bildete die Entladung einen röthlich leuchtenden, gegen die negative Kugel hin ansteigenden Berg, welcher von derselben durch einen dunklen Raum getrennt war. — Ist die Kugel positiv, so geht von ihr die positive Entladung in einem leuchtenden, sich nach der Seite der negativen Elektrode etwas verbreiternden Büschel aus, und, ähnlich wie beim Auftreffen eines Wasserstrahls auf eine Wasserfläche letztere concav eingebogen wird, so formt sich nun auch das Glimmlicht auf der negativen Platte zu einer schönen blauen Schale, welche in der Mitte von der Platte durch einen sehr schmalen Raum getrennt ist und mit ihren Rändern sich nach oben erhebt. Sie ist durch einen dunklen Raum von der ihr parallelen, unteren Begrenzung des positiven Büschels getrennt. Mit zunehmendem Druck werden die Phänomene auf der Platte in immer engere Grenzen zusammengedrängt, da

[1]) G. Wiedemann und R. Rühlmann, Pogg. Ann. 145, p. 391, 1872*; ganz ähnlich nachmals Reitlinger und Wächter, Wien. Ber. 82 [2], p. 17, 1880*; Wied. Ann. 12, p. 602, 1881*.

dann die Dichtigkeit der Elektricität auf derselben immer grösser, die absoluten Unterschiede der Ladung von der Mitte nach den Seiten hin immer bedeutender werden.

538 Die bereits §. 536 erwähnte Unabhängigkeit des Anoden- und Kathodenlichtes von einander zeigt sich auch, wenn man in einem Glasgefässe von der Form der Fig. 183 dicht neben der aus einem Drahtquerschnitt bestehenden Kathode k die Anode a_1 anbringt. Positives Licht entsteht nur bei sehr geringen Drucken dicht vor a_1 und das negative Licht breitet sich von k aus in geraden Strahlen bis zu der gegenüber liegenden, phosphorescirenden Stelle B des weiteren Glasgefässes Z_3 aus. Bringt man darauf die Anode in a_2 an, so verläuft das Kathodenlicht ganz unverändert, die positive Entladung mit ihren Schichten dringt aber entgegen der Richtung des Kathodenlichtes aus dem Röhrenabschnitt Z_2 bis in Z_1 vor [1]).

Fig. 183.

539 Geht positives Licht um die Biegung eines wiederholt rechtwinklig gebogenen cylindrischen Rohres, so erscheint an der convexen äusseren Seite jeder Biegung eine sehr dünne, helle, parabolische Phosphorescenzfläche, deren Axe mit der Längsrichtung des Rohres zusammenfällt und deren Scheitel gegen die positive Elektrode gekehrt ist. Nach der nega-

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Januar 1880, p. 94*; Wied. Ann. 11, p. 844, 1880*.

tiven ist sie verwaschen. Kathodenstrahlen würden nur an der ersten Biegung Phosphorescenz erzeugen. Werden vor die Biegung isolirte Drähte gebracht, so entwerfen sie scharfe Schatten in der Längsrichtung des Rohres von der Seite der Kathode nach der der Anode.

Die Ausbreitung des positiven Lichtes soll hiernach nach Goldstein[1]) ebenfalls als eine wesentlich geradlinige (schwach conische) von der negativen zur positiven Elektrode hin erscheinen.

Wo das positive Büschel die Gefässwand schneidet, erscheint eine Helligkeit, welche Goldstein als Phosphorescenz in Folge der positiven Strahlen auffasst. Bei einem aus geraden, rechtwinklig an einander gesetzten Stücken bestehenden Rohre beobachtet man die in Fig. 184 und 185 gezeichneten Erscheinungen, wobei die dunklen Stellen die leuchtenden bezeichnen. Auch hier kann man die geradlinige Fortpflanzung von der negativen Elektrode in jedem Röhrentheil, und namentlich im letzt gezeichneten Fall bis über die Oeffnungen der angesetzten Röhren zum Ende jedes Röhrentheils genau erkennen.

Fig. 184.

Fig. 185.

540 Das positive Licht bringt auch seitlich die Wandungen der Röhren zur Phosphorescenz; wobei sich indess die Schichten (siehe weiter unten) nicht abzeichnen. Die Wirkung geht von der ganzen Masse der Strahlen aus und beruht nicht auf ähnlichen Ursachen wie die Phosphorescenz durch die Kathodenstrahlen, sondern auf der directen Wirkung der Bestrahlung[2]).

Umgiebt man eine Entladungsröhre mit einer weiteren Glashülle,

---

1) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Januar 1880, p. 112*; Wied. Ann. 12, p. 107, 249*. — 2) S. auch Reitlinger und v. Urbanitzky, Wien. Ber. 73 [2], p. 685, 1876*.

Fig. 186, und füllt dieselbe mit verschiedenen fluorescirenden Flüssigkeiten, so kann man die Fluorescenz der letzteren an der Oberfläche der inneren

Fig. 186.

Röhre beim Durchgang der Entladungen sehr gut beobachten. Derartige Röhren sind in den mannigfachsten Formen hergestellt worden.

Besonders schön fluorescirt in den die Entladungsröhren umgebenden Behältern eine concentrirte Lösung von *Semen Daturae* mit grüner Farbe dicht an der stromleitenden Röhre. Eine verdünnte Lösung erscheint ganz grau.

Lösung von schwefelsaurem Chinin mit Weinsäure fluorescirt schön blau, Guajaktinctur dunkelblau, alkoholischer Quassiaholzextract blaugrün, alkoholischer und wässeriger Auszug von Rosskastanienrinde blaugrün, Curcumatinctur gelbgrün, Lösung von Chlorophyll in Aether zeigt dagegen keine Fluorescenz. Petroleum und der alkoholische Extract von Ofenruss oder von Steinkohlen oder Lösung von Theer in Benzol fluoresciren blau u. s. f.[1]).

Sehr schön nimmt sich die Fluorescenzerscheinung aus, wenn man auf den metallenen Teller einer Luftpumpe einen Becher von grünem Uranglas setzt und denselben im Inneren mit Stanniol bekleidet. Man bedeckt ihn mit einer oben tubulirten Glasglocke, und senkt durch den Tubulus einen Metalldraht bis auf die Stanniolbelegung. Verbindet man den Draht und den Teller der Luftpumpe mit den Polen der Inductionsspirale eines Ruhmkorff'schen Apparates, so wallt nach dem Evacuiren der Glocke eine Lichtgarbe über die Ränder des Bechers nach aussen, während derselbe lebhaft grün fluorescirt[2]).

541 Trotzdem sich die von beiden Elektroden ausgehenden Entladungen mit einander ausgleichen müssen, scheint sich indess das positive Licht unmittelbar an der negativen Elektrode nur schwierig zu bilden. Sehr schlagend sind hierfür Versuche von Hittorf[3]) mit Kugeln, Fig. 187, in denen die beiden Elektroden aus zwei sehr nahe an einander befindlichen, parallelen Drähten bestehen. Bei grosser Verdünnung der Luft erfüllt das von der Kathode ausgehende Glimmlicht die ganze Kugel, das positive Licht erscheint aber auf der der Kathode abgewendeten Seite der Anode und fluthet von dort zu den Wänden des Glases. Bei sehr starken Verdünnungen bleibt die ganze Anode mit Ausnahme der Biegungsstelle an dem sie tragenden Glasrohre dunkel.

---

[1]) Vergl. Seelhorst, Pogg. Ann. **137**, p. 167, 1869*. — [2]) Gassiot, Phil. Mag. [4] **7**, p. 97, 1854*. — [3]) Hittorf, Pogg. Ann. **136**, p. 1 und 197, 1869*.

Auch wenn die Anode nur mit einer Spitze der drahtförmigen Kathode gegenübersteht, Fig. 188, biegt sich das positive Licht in einem Bogen von der Kathode ab, wie wenn es fortgeblasen würde. Bei grösse-

Fig. 187.

+ −

Fig. 188.

+ −

rem Querschnitt der Anode geht es von der ganzen Fläche derselben einige Millimeter gegen die Kathode hin, um dann nach allen Seiten gegen die Wände abzubiegen.

Hebt man die Erscheinung des Glimmlichtes auf, indem man z. B. den als negative Elektrode dienenden Draht *c*, Fig. 189, so weit er im engen Halse des Gefässes liegt, mit einem vorn geschlossenen Glasrohr

Fig. 189.

a c

umgiebt, so bleibt dieser Widerstand gegen das Herantreten der positiven Entladung doch bestehen, so dass er nicht in dem Glimmlicht selbst zu suchen ist.

Mit Abnahme des Abstandes der Elektroden nimmt diese scheinbare Abstossung des positiven Lichtes zu.

Sehr deutlich zeigt sich nach Hittorf l. c. diese Erscheinung auch, wenn man zwei weite Cylinder oder Kugeln durch eine gerade enge Röhre verbindet und in der gemeinschaftlichen Axe zwei in der Röhre in einem Abstande von 1 mm endigende Drahtelektroden anbringt. Verbindet man die Gefässe noch durch ein (3,75 m) langes Spiralrohr, so geht die

Entladung durch letzteres und nicht zwischen den Enden der Elektroden über [1]).

542 Hierher gehört auch ein Versuch von Domalip [2]). In einer 2 cm weiten, 12 cm langen Röhre, deren conaxiale Elektroden auf nur 2 mm von einander entfernt waren, erschien kein positives oder negatives Licht. Nur an der Glaswand war ein 3 bis 4 mm breiter Ring gegenüber dem Ende der Kathode sichtbar.

543 Während diese Versuche nur im Allgemeinen einen Widerstand an der negativen Elektrode gegen den Uebergang der positiven Entladung zu derselben nachweisen, hat Eilh. Wiedemann [3]) den eigentlichen Ort dieser Erscheinung festgestellt, indem er die eine Elektrode beweglich machte (vergl. bereits §. 480). In ein verticales, cylindrisches Entladungsrohr, an dem oben die eine Elektrode angebracht war, war unterhalb ein engeres, verticales U förmiges Rohr eingeschliffen, in welchem auf Quecksilber ein längerer verticaler, bis auf seine Enden von einem Glasrohr umgebener Draht schwamm, der im Entladungsrohre selbst an seinem Ende eine ihm conaxiale plattenförmige Metallelektrode trug oder in einem Querschnitt frei endete. Durch Einfüllen und Ablassen von Quecksilber konnte die untere Elektrode der oberen beliebig genähert werden. Diente dieselbe als Anode, die obere feste Elektrode als Kathode, so breitete sich die positive Entladung, durchsetzt von den Kathodenstrahlen, gerade gegen die Kathode hin aus.

Näherte sie sich der Kathode, so verschwand bei gleichbleibendem Abstand der Schichten des positiven Lichtes die eine derselben nach der anderen, während die zurückbleibenden ihre Lage bewahrten. Ebenso verschwand der dunkle Trennungsraum, während zuletzt auf der positiven Elektrode eine kleine Lichtkuppe zurückblieb, wobei die Richtung der Entladung immer noch die gleiche war. Sobald indess die Anode in den dunklen Kathodenraum eintrat, bog sich die positive Entladung um, um wie ein Wasserfall zu dem diesen Raum nach der Seite der Anode hin umgebenden Glimmlicht überzugehen.

Die Vereinigung der positiven und negativen Entladung findet also im Glimmlichte statt.

---

[1]) Dass sich dies bei Anwendung des Inductoriums auch bei Bedecken der Kathode im engen Rohr mit einer Glashülle zeigt, beruht auf Leitung des Glases und zeigt nicht, dass der Widerstand nicht dem Glimmlichte zukommt (siehe Hittorf, Wied. Ann. **21**, p. 97, 1884*). Dass dieser Widerstand nicht durch die elektrostatische Ladung der Röhrenwände bedingt ist, wie Puluj (Wien. Ber. **85** [2], p. 871, 1882*; Beibl. **7**, p. 133*, s. w. u.) meint, folgt schon daraus, dass er sich auch in den weiten Kugeln, Fig. 188 u. 189, zeigt. — Weitere Versuche von Hittorf hierüber mit dem continuirlichen Strom grosser Säulen siehe weiter unten. — [2]) Domalip, Wien. Ber. **81** [2], p. 604, 1880*. — [3]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **20**, p. 764, 1883*.

544 Abweichend von dem Verhalten der Kathodenstrahlen entspricht das Verhalten der positiven Lichtsäulen ganz dem Verhalten biegsamer Leiter. Sie ziehen sich wie letztere an oder stossen sich ab, wenn man z. B. zwei Elektrodenpaare an den Enden eines Entladungsrohres anbringt und jedes Paar mit den Polen eines Inductoriums verbindet, oder wenn man der Röhre die Form eines Kreuzes giebt und an den Enden der gegenüberstehenden Arme desselben die Elektroden zweier Inductorien einfügt [1]).

545 Im Uebrigen wirkt die positive Entladung in einem Rohr nach aussen wie jeder andere vom Strom durchflossene Leiter. Magnetnadeln über derselben werden abgelenkt u. s. f.

546 Wir haben bereits §. 474 erwähnt, dass bei einer grösseren Verdünnung das positive Licht geschichtet ist. Dies hat schon Abria [2]) bei Entladungen von Inductionsströmen durch ein elektrisches Ei bei einer Verdünnung der Luft bis auf 2 mm wahrgenommen.

Besonders deutlich hat Grove [3]) die Schichtung bei Einführung eines Stückchens Phosphor beobachtet, welches auf eine, an der unteren Kugel des elektrischen Eies befestigte Platinschale gelegt wurde. Später fand Quet [4]) dieselbe Erscheinung beim Einbringen ganz geringer Mengen Terpentinöl, Chlorzinn, Alkohol, Holzgeist in den leeren Raum des Eies. Dabei sondert sich der von der positiven Elektrode ausgehende Lichtkegel in eine Reihe heller Schichten, welche der positiven Elektrode concentrisch sind, sich in weiterer Entfernung von derselben mehr abflachen, und durch dunkle Streifen von einander getrennt sind. Diese Streifen scheinen auf und nieder zu wallen, indem sie bei Ungleichheiten des Entladungsstromes ihre Stellung wechseln. Zwischen der negativen Elektrode und dem Lichtkegel bleibt unverändert eine dunkle Schicht.

Ganz analog gestalten sich die Erscheinungen in engeren Glasröhren. Die Schichtung tritt besonders schön hervor, wenn diese Röhren mit Cyangas gefüllt sind [5]).

In der Mitte des elektrischen Eies und der Entladungsröhren sind die Schichten meist gegen die negative Elektrode hin vorgebogen.

547 Die Gestalt der positiven Schichten nahe der Anode entspricht nach Bückmann [6]) den Niveauflächen des Potentials. Sie ist in einem elektrischen Ei, dessen positive Elektrode aus einer zwei- oder dreizinkigen Gabel gebildet ist, den Niveauflächen des Potentials an zwei oder drei elektrisch gleich geladenen Punkten ähnlich, wenn auch nicht gleich.

---

[1]) Trève, Compt. rend. 70, p. 926, 1870*. — [2]) Abria, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 7, p. 462, 1843*. — [3]) Grove, Phil. Trans. 1852, pt. 1, p. 100*. — [4]) Quet, Compt rend. 35, p. 949, 1852*; Pogg. Ann. Ergänzgsbd. 4, p. 507*. — [5]) Morren, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 4, p. 352, 1865*; Pogg. Ann. 130, p. 612*. — [6]) Bückmann, Ueber elektrische Entladung in verdünnten Gasen. Dissertation, Amsterdam 1881*; Beibl. 6, p. 256*.

548 Aehnliche Schichtungen des Lichtes zeigen sich auch in Metalldämpfen. Hierzu kittet Faye[1]) in zwei gegenüber liegende Tubulaturen eines vierfach durchbohrten Glasballons einen horizontalen Eisenstab, der in der Mitte zu einer dünnen Schale ausgehöhlt ist, in welche das zu untersuchende Metall gelegt wird. Durch die dritte Tubulatur geht ein Messingstab, welcher in einigen Centimetern Entfernung über der Eisenschale in einer Kugel endet. Durch die vierte Tubulatur wird der Ballon mit Sauerstoff gefüllt. Man leitet durch den Eisenstab den Strom einer sehr kräftigen Säule; die Eisenschale in seiner Mitte geräth ins Glühen und das darauf befindliche Metall, z. B. Natrium, verdampft und absorbirt den Sauerstoff. Durch den Raum, welcher nun bloss Metalldampf enthält, leitet man den Strom eines Ruhmkorff'schen Apparates, indem man den Eisenstab und den Messingstab mit seinen beiden Elektroden verbindet. — Bei Anwendung von Natrium erschien das am Messingstab als positiver Elektrode auftretende Licht gelb gefärbt und breit geschichtet; das negative Licht am Eisenstab war grünlich, theilte sich in der Mitte und zog sich gegen die Enden des Stabes hin. Dasselbe zeigte eine gegen die Längsrichtung des Eisenstabes normale Schichtung. Bei Abkühlung des Eisenstabes wurde das positive Licht, wie gewöhnlich, röthlich. Zinkspäne an Stelle des Natriums ertheilten dem positiven Licht eine schön blaue, aber schnell verschwindende Schichtung; Antimon färbte das Licht lila, Quecksilber grün, Cadmium dunkelgrün, Arsen lila, Schwefel schön blau. — Bei Anwendung von Schwefel und Arsen theilte sich das positive Licht schon weit über dem erhitzten Eisenstab, um zu den mit blauem Glimmlicht bedeckten Enden desselben zu beiden Seiten seiner stark erhitzten Mitte hinzugehen.

Auch wenn man zwei Glasplatten, deren eine mit Stanniol belegt, deren andere mit Wasser bedeckt ist, im luftverdünnten Raume mit ihren Kanten an einander bringt, so dass zwischen ihnen ein keilförmiger Luftraum entsteht, bilden sich in letzterem bei ihrer Verbindung mit dem Inductorium Schichten[2]).

549 Sehr gut kann man die Schichten in verschieden weiten, cylindrischen und anders gestalteten Entladungsröhren beobachten, in welchen sie ebenfalls gegen die Kathode convex gekrümmt sind, aber durch die Glaswand modificirt sein können. Führt man eine sehr empfindliche photographische Platte senkrecht zur Axe bei der Entladung an einem Entladungsrohr vorbei, so kann man im photographischen Bilde ihre Lage, Eigenbewegung, Gruppirung u. s. f. deutlich erkennen[3]).

550 Wir wollen zuerst die Röhren als überall gleich weit annehmen.

Die Schichtung des Lichtes in den Entladungsröhren ist abhängig

---

[1]) Faye, Compt. rend. **53**, p. 493, 1861*. — [2]) Jean, Mondes **5**, p. 393. — [3]) Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. **26**, p. 323, 1877*; Beibl. **1**, p. 569*.

von der Dichtigkeit der bei einer Entladung durch die Röhren geführten Elektricitätsmenge. Wird die Dichtigkeit zu gross, so verschwindet sie. Unterbricht man daher den Kreis der Inductionsrolle, ausser durch das Rohr, auch noch an einer anderen Stelle, so dass nur einzelne Funken in möglichst weitem Abstand daselbst überschlagen, so bemerkt man nach Grove[1]) in dem Rohre keine Streifung, sondern eine einfache Lichtmasse.

Aus demselben Grunde beobachtet man das geschichtete Licht schwieriger, wenn man, statt direct beide Pole der Inductionsrolle mit den Elektroden der Entladungsröhre zu verbinden, nur den einen Pol mit der einen Elektrode verbindet und aus dem anderen Pol Funken zieht. Man erhält dann eine ununterbrochene Lichtmasse, die stets von der negativen Elektrode ausgeht, und sich entweder bis zur positiven Elektrode ausbreitet oder in einiger Entfernung von der negativen Elektrode in geschichtetes Licht umwandelt. Letzteres tritt namentlich bei starker Pressung des Interruptors, ersteres bei schwächerer Pressung und bei schwachen Strömen auf[2]).

Ebenso bemerkt man, wenn die Elektricitäten von der Elektrisirmaschine den Elektroden zugeführt werden, keine Schichtung.

551 Verzögert man aber die Entladung, indem man z. B. in den Schliessungskreis einer Leydener Flasche oder der Elektrisirmaschine eine feuchte Schnur einschaltet, so tritt die Schichtung hervor. Bei Anwendung eines Inductoriums wird diese Verzögerung meist schon von selbst durch die Länge der Inductionsrolle herbeigeführt.

Verbindet man die eine Elektrode einer Entladungsröhre mit der äusseren Belegung einer Batterie, die andere mit einer Spitze, welche man der inneren Belegung nähert, so zeigt sich ebenfalls die Schichtung. Werden hierbei sehr grosse Plattencondensatoren von Stanniolblättern von 1300 Quadratfuss Oberfläche und achtfach zwischengelegtem paraffinirtem Pflanzenpapier verwendet, so dauern die Entladungen Minuten lang[3]). Auch in diesem Falle findet ein allmähliches Zuströmen der Elektricität statt.

Entsprechend erscheinen Schichtungen, wenn die eine Elektrode der Röhre mit dem Boden communicirt, die andere 1 bis 4 cm vom Conductor einer Elektrisirmaschine entfernt ist, und wo aus dem Draht an der letzteren Elektrode ein Büschel ausstrahlt. Sowie Funken erscheinen, ist die Schichtung schwächer. Sie verschwindet, wenn der Draht den Conductor berührt[4]), da dann die Elektricitätsausgleichung stossweise erfolgt.

---

[1]) Grove, Phil. Mag. [4] 16, p. 18, 1858*. — [2]) Quet u. Seguin, Compt. rend. 47, p. 964, 1858*. — [3]) Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. 27, p. 60, 1878*; Beibl. 2, p. 300*. — [4]) Bidaud, Compt. rend. 79, p. 374, 1874*. Hieran sich anschliessende Versuche siehe auch Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. 26, p. 90, 1877*; Beibl. 1, p. 415*; ähnlich auch Neyreneuf, Compt. rend. 79, p. 158, 1874*.

Nach Eilhard Wiedemann[1]) ist hiernach die mit Schichtung verbundene Entladung bei Einschaltung hinlänglich grosser Widerstände die normale Entladung, welche durch keine Nebenumstände complicirt wird, da bei jeder Entladung wesentlich nur eben die an der Ausgangsstelle der Entladung aufgehäufte Elektricitätsmenge übergeht.

552 Die Schichtenbildung hängt ferner von dem Widerstand der Gesammtschliessung ab, wenn der Strom durch eine galvanische Säule hergestellt wird.

Derartige Versuche sind namentlich von Gassiot[2]) angestellt worden. Der Strom von 4000 Elementen mit Platten von Kohle und amalgamirtem Zink, welche mit Regenwasser gefüllt waren, dem ein Löffel schwefelsaures Quecksilberoxydul zugesetzt war, wurde unter Einschaltung von Röhren voll destillirtem Wasser durch Entladungsröhren geleitet, welche mit Kohlensäure gefüllt und sodann durch Einbringen von geschmolzenem Kali evacuirt waren.

Bei Einschaltung immer geringerer Widerstände erscheinen erst an der positiven Elektrode schnell hinter einander halbmondförmige Scheiben von rothem Licht, die bei Abnahme des eingefügten Widerstandes von der positiven Elektrode zurückweichen, bis sich 19 Scheiben gebildet haben. Bei weiterer Widerstandsverminderung fliessen die zwei Scheiben nächst der negativen Elektrode zu einer doppelconvexen Linse zusammen, deren eine, der negativen Elektrode zugekehrte Seite blau, deren entgegengesetzte röthlich, deren Mitte glänzend roth ist. Zugleich erscheint eine neue halbmondförmige Scheibe an der positiven Elektrode. Bei noch weiterer Verminderung des Widerstandes laufen immer weitere zwei Scheiben zusammen, und es erscheint eine neue halbmondförmige Scheibe am positiven Pol, bis endlich alle 19 Schichten doppelconvex sind. Dabei zeigt sich an den Stellen, wo nächst der negativen Elektrode die Lichtscheiben das Glas treffen, ein schwarzer metallischer Absatz. Der Magnet (s. w. u.) lenkt das Licht nur einseitig ab, wobei die Scheiben sich wieder trennen, indem der Strom einen grösseren Weg zurückzulegen, also einen grösseren Widerstand zu überwinden hat.

Im rotirenden Spiegel erscheinen hierbei die Entladungen continuirlich.

553 Die Schichtung ist endlich abhängig von der Verdünnung des Gases in den Röhren. Bei schwächerer Verdünnung zeigt sie sich nicht, man beobachtet nur einen Uebergang eines wenig in die Breite ausgedehnten, glänzenden Lichtstreifens zwischen den Elektroden. — So erhielt man län-

---

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 760, 1883*. — [2]) Gassiot, Rep. Brit. Assoc. 1865 [2], p. 15*. Zu ähnlichen Versuchen wurden 3360 mit gesättigter Kochsalzlösung geladene Zinkkupferelemente verwendet. (Mondes 9, p. 713*, auch Proc. Roy. Soc. 12, p. 329, 1863*.)

gere Zeit die Schichtung nicht in dem Torricelli'schen Vacuum, weil man die Feuchtigkeit nicht aus den Röhren entfernt hatte.

Dies rührt wohl daher, dass in dichterer Luft die an den Elektroden angehäuften Elektricitätsmengen grösser sein müssen, um dieselbe in discontinuirlicher Entladung zu durchbrechen, und dabei eben wegen der grösseren Elektricitätsmengen die Entladung nicht mehr normal ist. — Vermeidet man sehr sorgfältig im Torricelli'schen Vacuum jede Spur von Wasserdampf oder Gas, so dass dasselbe nur noch äusserst wenig Quecksilberdampf enthält, so erscheinen breite und weniger scharf begrenzte helle und dunkle Streifen. Die Entladung wird „nebelartig". Lässt man dann durch ein kleines Loch, welches man z. B. durch Durchschlagen eines elektrischen Funkens in der Glasröhre angebracht hat, langsam ein Gas in das Vacuum eintreten, so ziehen sich die Schichten immer enger zusammen und ändern auch ihre Farbe[1]).

554 Wird ein Gas in einer Entladungsröhre allmählich verdünnt, bis die Gasentladung erscheint, so treten nach de la Rive[2]) zuerst bei Durchleiten des Stromes eines Inductoriums, z. B. in Stickstoff oder Luft, einige Schichten an der positiven Elektrode auf, wobei der Lichtstrom noch sehr dünn ist. Allmählich verbreitert er sich, der dunkle Raum erscheint an der negativen Elektrode. Die Schichtung ist bei stärkeren Drucken sehr fein und beständig; bei schwächerem Drucke werden die Schichten breiter und wolkenartig und oscilliren hin und her, bis sie sich zuletzt in einen continuirlichen Lichtstrom auflösen, der endlich auch erlischt. Bei Drucken unter 2 mm erscheint im dunklen Raume blassrosa gefärbtes Licht. Je grösser der Widerstand des Gases ist, d. h. ein um so grösseres Potential auf den Elektroden cet. par. zum Durchgang der Elektricität durch die Röhren erforderlich ist, bei um so geringerer Verdichtung erscheint die Schichtung[3]).

555 Bei höheren Drucken verschwinden die Schichten zuerst nahe der positiven Elektrode und werden durch helleres continuirliches Licht ersetzt, bei noch höherem Drucke verschwinden sie ganz. Dabei rückt das positive Licht allmählich gegen die negative Elektrode vor; im Anfang der Entladung weniger, in der Mitte derselben stark, nachher wieder schwächer. Auch dieses continuirliche Licht erscheint im rotirenden Spiegel aus einzelnen Lichtstössen gebildet. Zugleich concentrirt es sich in der Axe der Röhre und schwillt an dem der negativen Elektrode zu-

[1]) Gassiot, Proc. Roy. Soc. 10, p. 36 u. 393, 1860*; Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 10, p. 58*; Pogg. Ann. p. 156, 1861*. — [2]) De la Rive, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 8, p. 445, 1866*; Pogg. Ann. 131, p. 441*. — [3]) Siehe ebendaselbst eine Beschreibung der Erscheinungen, welche eintreten, wenn man in ein evacuirtes elektrisches Ei an der einen oder anderen Elektrode Gas eintreten lässt oder daselbst die Luft wieder entfernt, wobei selbstverständlich die Erscheinungen bei allmählicher Ausgleichung der Dichtigkeit des Gases an den verschiedenen Stellen des Rohres sich ändern.

gekehrten Ende an, so dass das Bild im rotirenden Spiegel wie eine von der an der positiven Elektrode gezeichneten Lichtlinie herabhängende, U förmige dunkle Wolke erscheint, die an der dem Beginn der Entladung und der der negativen Elektrode zugekehrten Seite hell gesäumt erscheint und aus einzelnen Verticalstreifen besteht. Bei steigendem Druck (75 mm) erscheint die Wolkenform immer deutlicher, das positive Licht zieht sich gegen die Mitte der Röhre zusammen und zeigt auf- und abwallende Anschwellungen, die in der Wolke als helle Horizontalfalten erscheinen und deren Zahl mit dem Druck steigt. Bei 150 mm Druck erscheint daneben ein Funken; bei 250 mm ist dieser allein vorhanden. Die Funkenbahn ist hierbei öfter unterbrochen [1]).

556 Die Farbe der Schichten und ihrer einzelnen Theile variirt sehr bedeutend. So erscheint z. B. dieselbe Schicht von 1,5 bis 2,5 cm Dicke mit abnehmender Dichte des Gases nach einander halb blau, halb rosa; ganz blau; halb gelb, halb blau; ganz grau.

Auch die einzelnen Schichten können verschiedene Farben zeigen; so war z. B. in einem mit Wasserstoff gefüllten cylindrischen Rohre die erste Schicht blau, die zweite rosa, die dritte halb rosa, halb blau u. s. f. Indess ist das Spectrum der Schichten das gleiche, so dass nur die Vertheilung der Intensitäten in demselben eine verschiedene ist. Je weiter die Schichten gegen die negative Elektrode hin liegen, desto besser und schärfer sind sie unter allen Bedingungen ausgebildet.

Häufig erscheint die Schichtung nicht in der ganzen Länge einer cylindrischen Röhre, meist erfüllt sie um so längere Strecken, je weiter das Rohr ist [2]).

557 Laufen die Kathodenstrahlen in gleicher oder entgegengesetzter Richtung mit der positiven Entladung, so können sie dieselbe auf beliebige Strecken durchdringen; die Kathodenstrahlen erzeugen auf der ihrer Ausgangsstelle gegenüberliegenden Wand Phosphorescenz, wie wenn das Anodenlicht nicht vorhanden wäre (vergl. §. 538).

Lässt man dagegen in einer Röhre, in welcher eine geschichtete positive Entladung sich in axialer Richtung ausbreitet, von einem metallischen Leiter Kathodenstrahlen ausgehen, welche von der einen Röhrenwand zur anderen die positive Entladung quer durchsetzen, so erscheint an der Wand keine continuirliche Phosphorescenz, sondern ein System hell leuchtender Ringe, welche dieselben Zwischenräume wie die Schichten haben, und, falls diese auf und ab oscilliren, mit ihnen ihre Stelle wechseln [3]).

---

[1]) Wüllner, Pogg. Ann. Jubelband p. 32, 1874*. — [2]) Vergl. auch die Beschreibung der vielfach beobachteten Schichten durch Goldstein (Berl. Monatsber. 4. Mai 1876, p. 206*) und für die folgenden Paragraphen auch dessen Abhandlung (Berl. Monatsber. 28. Juli 1881, p. 876*; Wied. Ann. 15, p. 277*. — [3]) Goldstein, Wien. Ber. 74 [2], p. 467, 1876*.

558 Der Abstand der dicken wolkigen Schichten, welche in trockener reiner Luft oder trockenem, stark verdünntem Wasserstoff entstehen, und die Goldstein[1]) gegenüber den tellerartigen, engen Schichten als volle Entwickelungen ansieht, ist bei deutlichster Ausbildung bei weiteren Röhren nahezu dem Röhrendurchmesser proportional; sie werden mit Zunahme des Querschnittes undeutlich.

Entsprechend bildet sich nach Wüllner in weiteren cylindrischen Röhren das positive Licht weniger aus[2]).

Vergrössert man alle Dimensionen eines Entladungsrohres ganz gleichmässig, so wachsen die Intervalle der Schichten, gleich viel, welches die Gestalt der Röhren ist; so z. B. in kegelförmigen Röhren von gleicher Kegelöffnung, in verschieden weiten Röhren u. s. f.[3]).

559 Bei trockner Luft, Wasserstoff und Gemengen beider ändert sich in Cylinderröhren von verschiedener Weite (2 mm bis 4 cm) der mittlere Abstand der Schichten bei verändertem Gasdruck in gleichem Verhältniss.

Dabei ist es gleich, ob die verschieden weiten Röhren getrennt verwendet oder hinter einander zu einer Röhre vereint werden.

Dasselbe Gesetz dürfte nach Goldstein auch für die Abstände der je einander entsprechenden Schichten gelten[4]).

Nehmen die Gasverdünnungen in einer geometrischen Reihe zu, so wachsen nach Goldstein die Schichtenintervalle ebenfalls nahezu in einer geometrischen Reihe, indess mit kleinerem Exponenten, so dass bei dreifacher Verdünnung die Intervalle nur 1,33 mal so gross werden.

560 Verschiebt man in einem Entladungsrohre die positive Elektrode, so erscheint nach von Waha[5]), wenn sie der negativen Elektrode näher als ein Schichtenintervall liegt, gar keine Schicht des positiven Lichtes, wird sie von derselben entfernt, so tritt eine Schicht nach der anderen auf. Dabei ist nach Goldstein die Grenze des positiven Lichts von der Länge des positiven Pols und der Länge der ganzen Entladung unabhängig. Demgemäss verschieben sich bei Verstellung der negativen Elektrode sämmtliche Schichten um ebenso viel von oder zum positiven Pol (vergl. §. 543). Im letzteren Falle verschwindet die der Verrückung entsprechende Zahl der Schichten am positiven Pol.

561 Wie Eilhard Wiedemann[6]) nachgewiesen hat, hängt hierbei obige Grenze nur von der Grenze des Glimmlichts ab, denn wenn man dasselbe durch einen Magnet zur Seite drückt, so rückt das positive Licht weiter vor.

---

[1]) Goldstein, Wied. Ann. 12, p. 272, 1881*. — [2]) Wüllner, l. c.*. — [3]) Goldstein, l. c. — [4]) Goldstein, Berl. Monatsber. 28. Juli 1881, p. 876*; Wied. Ann. 15, p. 277*. — [5]) von Waha, Publ. de l'Inst. de Luxembourg, 6. Juli 1880*; Beibl. 5, p. 151*. — [6]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 779, 1883*.

562 Nimmt von der positiven zur negativen Elektrode hin an einer Stelle der Querschnitt des Entladungsrohres plötzlich ab, so erscheint die Entladung vor derselben gegen die Anode hin wie das negative Licht, um so mehr, je grösser die Querschnittsänderung ist, so dass also an der Einschnürungsstelle sich gewissermaassen eine secundäre negative Elektrode bildet. Dabei verhält sich jede Abtheilung eines aus mehreren, verschieden weiten Stücken bestehenden Rohres wie ein besonderes Rohr, so dass, selbst wenn in einem Theil desselben wegen seiner Länge die Schichtung gegen das negative Ende hin undeutlich wird, sie doch an der Grenze des folgenden Theils wieder hervortritt.

Ganz dasselbe Verhalten zeigt eine cylindrische Röhre, welche durch Glaswände in einzelne Abtheilungen getheilt ist. Auch hier erscheinen die einzelnen Theile wie getrennte Röhren. In jeder Abtheilung liegt zur Seite der negativen Elektrode negatives Licht, zur Seite der positiven positives Licht; zwischen beiden je ein dunkler Raum [1]). In allen sind die Schichten nach Form, Farbe, Lage gleich geordnet; die Abstände der entsprechenden (von der negativen, primären oder secundären Elektrode an gerechneten $n$ten und $n + 1$ten) Schichten unter einander und resp. von dem betreffenden negativen Pol sind gleich.

563 Das an der Grenze ungleich weiter Abtheilungen einer Entladungsröhre auftretende secundäre negative Licht verhält sich nach Goldstein ganz wie das primäre; da, wo seine Strahlen auftreffen, entsteht Phosphorescenz, es wird vom Magnet abgelenkt wie die Kathodenstrahlen u. s. f.

564 Verdünnt man allmählich die Luft in einem aus zwei nur wenig verschiedenen Abtheilungen bestehenden cylindrischen Rohr, so löst sich das aus der engeren in die weitere Abtheilung hineinragende negative Licht immer schwächer werdend von der engen Röhre ab und tritt als erste positive Schicht in die weitere hinein. Danach sieht Goldstein jede Schicht positiven Lichts als einen Complex an, welcher dem negativen Kathodenlicht entspricht.

Der dunkle Raum zwischen positivem und negativem Licht bildet dann den Zwischenraum zwischen zwei Schichten.

565 In Folge des Auftretens von negativem Glimmlicht an der Uebergangsstelle von einem engeren zu einem weiteren Theil eines Rohres kann man dieses Licht hervorrufen, indem man in ein solches Rohr eine von vielen kleinen Löchern durchbohrte nichtleitende Platte einsetzt. Geht die Entladung durch die Löcher hindurch, so verhält sich bei genügender Zahl und Annäherung derselben die Platte ganz wie eine gleich-

[1]) Goldstein, l. c. Ein Theil dieser Erscheinungen ist schon an den Holtz'schen Ventilröhren beobachtet worden, s. Poggendorff, §. 595 u. f.*.

gestaltete Metallkathode. Je kleiner die Oeffnungen sind, desto mehr tritt diese Uebereinstimmung hervor. Hierfür ist also der Gesammtquerschnitt der Entladungen maassgebend.

Goldstein[1]) verwendet zu diesem Versuch ein Rohr von beifolgender Gestalt, Fig. 190, in welchem *a* und *k* die beiden Elektroden sind, und auf das enge und vorn offene, kurze Metallrohr *r* eine vielfach durchbohrte und vorn durch eine Glaskuppe *g* geschlossene Papierhülse geschoben ist. Wie der Papierschirm wirken auch Glas- und isolirte Metalldrahtgewebe.

Fig. 190.

566 Bei Anwendung eines Inductoriums könnte man glauben, dass die einzelnen Schichten des elektrischen Lichtes dadurch hervorgerufen wären, dass bei der Bewegung des Interruptors des Inductionsapparates eine Reihe einzelner Entladungen einander folgte, von denen jede eine erleuchtete Luftmasse von der positiven zur negativen Elektrode hinführte. Dem ist jedoch nicht so, denn schon bei einmaligem Oeffnen des Kreises des inducirenden Stromes zeigt sich die Schichtung, selbst wenn dieses Oeffnen ganz plötzlich erfolgt[2]), indem man z. B. eine mit dem einen Ende der Leitung verbundene Metallspitze von einem mit dem anderen Ende derselben verbundenen Metallblech abschiebt.

Ja sogar bei dem Durchschlagen eines einzelnen Funkens der Elektrisirmaschine oder der Leydener Flasche durch eine Entladungsröhre oder das elektrische Ei erhält man schon die Streifung des elektrischen Lichtes; nur muss man, wie bereits §. 551 erwähnt, die Entladungszeit derselben auf irgend eine Weise, z. B. durch Einschaltung einer feuchten Schnur[3]), verzögern.

Man könnte ferner vermuthen, da jede einzelne Entladung des Inductoriums, wie auch der Leydener Flasche, aus einer Reihe von Partialentladungen besteht, welche in kurzen Zwischenräumen auf einander folgen, dass jede derselben zur Bildung einer einzelnen leuchtenden Schicht Veranlassung gäbe. Lässt man indess vor einer Spectralröhre, durch welche die Entladungen hindurchgehen, einen Spiegel schnell um eine, der Axe des Rohres parallele Axe rotiren, so erscheinen die Bilder des durch die auf einander folgenden Partialentladungen erleuchteten Rohres bei der Projection auf eine matte Glasplatte neben einander, und zwar ist stets das ganze Rohr im Bilde erleuchtet (mit Ausnahme des

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 88*; Wied. Ann. 11, p. 832, 1880*. — [2]) Quet, Compt. rend. 35, p. 949, 1852*; Pogg. Ann. Ergänzungsbd. 4, p. 507*. — [3]) Vergl. van der Willigen, Pogg. Ann. 98, p. 494, 1856*.

dunklen Raumes, welcher, da die auf einander folgenden Partialentladungen in ihrer Richtung abwechseln können, auch abwechselnd bei den einzelnen Bildern an der einen und anderen Elektrode liegen kann), und jedes Bild zeigt die Schichtung [1]).

Die Zeitdauer jeder Entladung erscheint dabei instantan.

567 Wird die Elektricität in langsamem Strom der Entladungsröhre zugeführt, wie durch eine Holtz'sche Maschine, so bleiben die Schichten bei jeder Entladung an ihrer Stelle. Werden aber die Entladungen durch ein Inductorium bewirkt, so finden sie nicht mehr alle in ganz gleicher Weise statt, die Schichten wechseln ihre Stellen, sie flackern hin und her. Meist geschieht dies rhythmisch, da im Allgemeinen nach einer bestimmten Periode die Anfangsverhältnisse wieder auftreten. Zugleich dauert jede Entladung eine Zeit lang an. Man kann diese complicirten Erscheinungen nach Spottiswoode [2]) verfolgen, wenn man auf die der Axe der Entladungsröhre parallele Axe eines rotirenden Spiegels einen Zahn aufsetzt, welcher die den inducirenden Kreis öffnende und schliessende Metallspitze bei jeder Umdrehung einmal aus dem die Leitung vermittelnden Quecksilber hebt, oder wenn man gegen ein mit Platinsectoren ausgelegtes Ebonitrad eine Platinspitze schleifen lässt, während zwischen beiden verdünnte Schwefelsäure hindurchfliesst. So wurde der Strom 250- bis 2000 mal in der Secunde unterbrochen. Vor weitere Röhren wurde dabei ein Spalt gestellt.

Hierbei zeigt sich ein Einfluss des Widerstandes der Schliessung. Sind bei einem bestimmten Widerstande im primären Kreise die Schichten stationär, so verschieben sie sich bei Vermehrung desselben scheinbar vorwärts zur negativen Elektrode, bei Verminderung des Widerstandes rückwärts zur positiven. Wird im ersten Falle der Widerstand weiter vermehrt, so nimmt die scheinbare Vorwärtsbewegung allmählich so zu, dass man sie mit dem Auge nicht mehr verfolgen kann, wird dann langsamer und kehrt sich zuletzt um, wenn die Entfernung zweier zeitlich auf einander folgender und einander correspondirender Schichten allmählich bis auf den Abstand zweier Schichten derselben Entladung und darüber steigt.

In verschieden weiten, z. B. conischen, Röhren wandert die Schichtung in den weiteren Theilen stärker, als in den engen Theilen der Röhren. Die Eigenbewegung der Streifen vermindert für sich die Länge der geschichteten Entladung; da sich indess die Schichten von Zeit zu Zeit erneuern, wobei die neuen Schichten in gleichen Abständen von einander und von den früheren Schichten auftreten, wie letztere unter einander, so kann dadurch jene Länge wieder vergrössert werden. Stets geschieht

[1]) Feddersen, l. c., Bd. IV, §. 196. Paalzow, Pogg. Ann. 112, p. 567, 1861, 118, p. 178, 357, 1863*. Fernet, Compt. rend. 61, p. 259, 1866*. — [2]) Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. 25, p. 73, 547, 1877*; Beibl. 1, p. 294*; vergleiche auch Wüllner, Pogg. Ann. Jubelband, p. 32, 1874*.

dies indess allmählich. Bewegen sich die Schichten sehr schnell, so verschwindet für das blosse Auge die Schichtung; sie kann aber oft noch im rotirenden Spiegel beobachtet werden.

568 Einen ähnlichen Einfluss hat bei den Strömen des Inductoriums die Verdünnung des Gases. So scheinen bei abnehmendem Druck (von 5 bis 6 cm an) die Schichten bei der Drehung des Spiegels erst gegen die positive, dann gegen die negative Elektrode vorzuschreiten und zeigen die Gestalt eines flachen V. Die Krümmung ist erst gegen die negative, dann gegen die positive Elektrode gekehrt. Der Wendepunkt liegt um so weiter von dem Beginn der Entladung ab, je weiter man sich von der negativen Elektrode entfernt.

Dieses Wandern der Schichten dürfte davon herrühren, dass der ersten Entladung des Inductoriums Partialentladungen der aus dem Inneren desselben den Elektroden zufliessenden Elektricitäten folgen und diese nunmehr von dem Widerstande, welchen sie vor der Entladung zu durchlaufen haben, beeinflusst werden [1]). Auch Rückentladungen können auftreten.

569 Eine eigenthümliche Umwandlung der Richtung der Schichten hat Hellmann [2]) beobachtet. In einem Aetzkali enthaltenden Vacuumrohr bemerkte Hellmann beim Durchleiten der Ströme eines mittelgrossen Inductoriums erst die bekannte, dem Oeffnungsstrome entsprechende einseitige Schichtung, dann erschien eine doppelte Schichtung, bei der in der Mitte der Röhre zwei Schichten, eine dem positiven Pol nähere röthliche, die fernere bläuliche, einander sehr nahe standen. Bald wurde die Schichtung gegen die negative Elektrode concav, die Schichten waren röthlich und standen weiter von einander, als die Schichten der positiven Entladung, um so deutlicher, je näher sie an der Kathode lagen. Langsame Unterbrechungen des Inductoriums liessen die Erscheinung besonders gut hervortreten. — Da die Schichtungen nur bei einer bestimmten Stromesdichte auftreten, welche wiederum von der Dichtigkeit des Gases abhängt, die durch die Temperaturerhöhungen bei der Entladung geändert werden kann, so wäre es möglich, dass hierdurch bei den Versuchen Bedingungen eingetreten waren, durch welche einmal die dem Schliessungsinductionsstrome, sodann die dem Oeffnungsstrome entsprechenden Entladungen in der der Schichtenbildung entsprechenden Art die Röhre durchzogen.

570 Ueber den Einfluss der Erwärmung der Entladungsröhren und des in ihnen enthaltenen Gases auf die positive Entladung habe ich [3]) einige Versuche angestellt. Der Entladungsapparat bestand dabei aus zwei conaxialen, 12 mm weiten und 70 mm langen cylindrischen Glasröhren, die

[1]) Fernet, Compt. rend. 90, p. 680, 1880*; Beibl. 4, p. 817, 931*. — [2]) Hellmann, Wied. Ann. 19, p. 816, 1883*. — [3]) G. Wiedemann, Ber. d. k. Sächs. Ges. d. Wissensch. 1876*; Pogg. Ann. 158, p. 67*.

durch ein 115 mm langes und 1 mm weites Capillarrohr verbunden waren. In den Axen der weiteren Glasröhren waren Platindrähte als Elektroden angebracht, die an ihren, dem Capillarrohr zugekehrten Enden mit kleinen Glaskuppen bedeckt waren. Die Röhren waren mit Stickstoff oder Wasserstoff gefüllt. Die Zahl der Entladungen in denselben wurde in der später (§. 578 u. f.) zu erwähnenden Art gemessen. Dieselbe änderte sich kaum, als die Hüllen um die Elektroden oder das Capillarrohr schwach erhitzt wurden. Wurde aber letzteres an einer Stelle stark erhitzt, wenn auch noch lange nicht bis zum Glühen, so nahm bei gleicher Elektricitätszufuhr die Zahl der Entladungen in der Zeiteinheit stark zu (z. B. im Verhältniss von 7 : 12). Dann erschien die erhitzte Stelle nicht mehr röthlich oder bläulich, sondern hellgelb gefärbt, und mit dem Spectroskop war in dem vorher reinen Wasserstoff- oder Stickstoffspectrum die Natriumlinie sehr hell sichtbar. Im rotirenden Spiegel zeigten sich an der erhitzten Stelle nur die einzelnen, scharf von einander getrennten Entladungen gelb gefärbt, so dass also ein dauerndes Glühen der natriumhaltigen Glaswand nicht eintrat. Zugleich breitete sich während der Entladungen das gelbe Natriumlicht nicht über die stark erhitzte Stelle der Röhren aus.

Bei stärkerer Erhitzung des Raumes um die eine oder andere Elektrode erschien auch nur an den die Platindrähte vorn bedeckenden Glaskuppen oder unmittelbar auf denselben gelbes Natriumlicht, welches sich aber ebenfalls nicht weiter ausbreitete. Dabei wurden die Abstände der Entladungen grösser (z. B. im Verhältniss von 10 : 13). Wurde aber der zur Luftpumpe führende Hahn geöffnet, so dass sich die durch die Erwärmung erzeugte Steigerung des Luftdrucks wieder ausgleichen konnte, so fiel der Entladungsabstand wieder auf das frühere. Also selbst bei Temperaturerhöhungen bis nahe zum Schmelzen des Glases ändert sich die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge nicht merklich (siehe weiter unten).

571 Die Erwärmung einer Stelle einer Entladungsröhre wirkt auf die Schichten des positiven Lichtes daselbst ein. Dieselben werden deutlicher und schärfer, die dunklen Zwischenräume breiter. Zugleich werden die Schichten gegen die Kathode immer convexer.

Der Grund dieser Erscheinungen ist schon in der Verdünnung des Gases durch die Erwärmung zu finden, wobei ebenfalls die Schichten breiter werden; dass sie sich gegen die Kathode zuspitzen, kann an der stärkeren Erhitzung und dadurch bedingten stärkeren Verdünnung an den Glaswänden liegen. Bei sehr starkem Erhitzen entsteht an der erhitzten Stelle ein dunkler Raum, indem dann die Entladung durch das leitend gewordene Glas hindurchgeht[1]).

---

[1]) Rosicky, Wien. Ber. 74 [2], 1876*, vergleiche auch die Versuche von Poggendorff an Ventilröhren, §. 595 u. f.

572 Beim Erhitzen des Raumes an der negativen Elektrode verschwindet zuerst der dunkle Raum, die positiven Schichten gehen bis zur Kathode und endlich entsteht ein viel grösserer dunkler Raum als vorher. Da sich dünnere Kathoden beim Durchgange des Stromes stärker erhitzen, so ist auch bei ihnen der dunkle Raum grösser.

Erhitzt man eine Entladungsröhre am positiven Pol, so ändert sich der dunkle Raum an der negativen Elektrode nicht; nur bei kurzen Röhren wird er kleiner, wofür an dem positiven Pol ein dunkler Raum auftritt (vergl. auch die Versuche von Hittorf[1]).

573 Erhitzt man den inneren Raum einer Röhre an einer Stelle durch eine vom Strom durchflossene, glühende Drahtspirale, so entsteht zu beiden Seiten derselben ein dunkler Raum, dem zwei dunkle, der Reihe nach schmalere Schichten folgen. In der Kälte ändert die Spirale den Gang der Entladungen nicht.

Dient hierbei die glühende Spirale als Anode, so geht die rothgelbe Farbe des positiven Lichtes auf ihr in Blau über und dasselbe verschwindet bei der Weissgluth ganz (möglicher Weise, da das Gas dabei direct leitend wird, vergl. die Versuche von Blondlot weiter unten).

Erhitzt man die Kathode allein, indem man statt derselben die Kohle einer Glühlampe anwendet, so wird dadurch der Durchgang des Stromes in höchst verdünnten Gasen erleichtert, während, wenn der Kohlenbügel als Anode dient, der Strom nicht hindurchgeht[2]).

574 Sehr eigenthümlich ist das nach Unterbrechung der Entladungen fortdauernde Nachleuchten der Entladungsröhren.

Geissler formt hierzu die Röhren aus einem Schlangenrohr, Fig. 191, von etwa 5 mm Durchmesser, in dessen einzelne Windungen Glaskugeln von etwa 3 bis 4 cm Durchmesser eingeblasen sind.

Fig. 191.

Füllt man solche Röhren mit etwa 40 Thln. verdünnter Luft, 60 Thln. Sauerstoff und einer Spur wasserfreier Schwefelsäure und lässt einen oder mehrere Entladungen des Inductoriums hindurchgehen, so leuchten die-

---

[1]) Hittorf, Wied. Ann. 21, p. 120, 1884*, mit Hülfe des continuirlichen Stromes einer Säule. — [2]) Goldstein, Wien. Anz. 13. März 1884* (während des Druckes erschienen). Dasselbe hat schon vorher Hittorf l. c. für continuirliche Ströme publicirt.

selben noch längere Zeit mit einem grauen oder gelblich weissen, langsam verschwindenden Licht.

Nach Morren[1]) zeigt sich das weissliche Licht nicht in der die negative Elektrode enthaltenden, wohl aber sehr stark in der die positive Elektrode enthaltenden Endkugel.

Nach Riess[2]) erlöschen die Endkugeln der Röhre eher, als ihre mittleren Theile, meist die negative Kugel zuerst. — Bei zu starken Strömen hört das Nachleuchten auf. Es sind deshalb nur schwache Ströme anzuwenden. — Wild[3]), welcher das Nachleuchten in einem mit Schwefelkohlenstoffdampf und Luft gefüllten elektrischen Ei 4 bis 5 Minuten lang beobachtete, glaubte es deshalb auf eine Zersetzung des Schwefelkohlenstoffs in Kohle und Schwefel durch die Entladungen und eine nachherige langsame Verbrennung des Schwefels zu Schwefelsäure zurückführen zu können, da es sich bei völliger Abwesenheit von Luft nicht zeigte.

575 Röhren mit reinem Sauerstoff oder reinem Stickstoff zeigen nach Morren das Nachleuchten nicht, Röhren voll Sauerstoff, dem wenig Stickstoff beigemengt ist, ebenso wenig. Bei einem Gehalte des Sauerstoffs an 30 Proc. Stickstoff erscheint das Nachleuchten vorübergehend; bei mehr Stickstoff wiederum schwächer. Wird dem Gemenge von Sauerstoff und Stickstoff ein wenig Salpetersäure oder Kohlensäure beigemengt, so erscheint es etwas lebhafter, aber wenig andauernd. Dagegen tritt es bei Zusatz eines Tropfens Nordhäuser Schwefelsäure zwar nicht sogleich, aber doch einige Zeit nach dem Hindurchleiten des Stromes durch die Röhre auf.

Sogleich erscheint es, wenn man die Verbindung N_2O_3, $2\,SO_3$ vollkommen wasserfrei in die Röhre einführt und dieselbe gehörig evacuirt. In allen Phosphorescenzröhren bemerkt man an der negativen Elektrode einen gelben, pulverigen Absatz, der in ihnen auch beim Ueberspringen von Funken zwischen Metallkugeln auftritt. Bringt man von diesem eine ganz kleine Menge in eine mit Sauerstoff und Stickstoff gefüllte Röhre, welche für sich nicht nachleuchtet, so tritt das Nachleuchten sogleich auf.

Die Phosphorescenz beginnt bei 6 bis 8 mm Druck, ist dann weisslich, wolkig und wird bei geringerem Druck gelb und durchscheinender. Bei 1,5 mm Druck erscheint sie am schnellsten, wenn auch nicht besonders glänzend.

Nach Morren soll hiernach auch bei dem vorher beschriebenen Versuch die oben erwähnte feste Verbindung entstehen, indem sich zuerst durch die elektrische Entladung aus dem Stickstoff und Sauerstoff N_2O_3 bildet, welches sich mit $2\,SO_3$ vereint. Man kann diese Verbindung direct

---

[1]) Morren, Ann. de Chim. et de Phys. [4] 4, p. 293, 1864*; Pogg. Ann. 127, p. 643*; Compt. rend. 68, p. 1261, 1869*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 110, p. 523, 1860*. — [3]) Wild, Pogg. Ann. 111, p. 621, 1860*.

in einem Ballon herstellen, der Sauerstoff, Stickstoff und Schwefelsäure enthält, wenn man elektrische Funken hindurchschlagen lässt. Durch weitere Entladungen wird die Verbindung zersetzt, indem sich SO_3 zur positiven, N_2O_3 zur negativen Elektrode begiebt (?). Da nun die Zersetzung an allen Stellen des Rohres stattfindet, so sollte die Schwefelsäure beim Uebergang aus dem gasförmigen in den festen Zustand das Leuchten bedingen.

Es könnte aber sehr wohl sein, dass, wenn in den einzelnen Schichten der Entladung die Verbindung N_2O_3, $2SO_3$ dissociirt wird, sie sich eben unter Erscheinung der Phosphorescenz während und nach der Entladung von selbst wieder bildet.

Ist dann ein Ueberschuss von Sauerstoff im Rohr, so kann sich nach der Zersetzung das N_2O_3 mit demselben zu N_2O_4 verbinden, und die Farbe des Lichtes wird röthlicher. Ist schweflichte Säure im Ueberschuss, so erscheint das Nachleuchten in dem ihr eigenthümlichen bläulichen Licht; ein Ueberschuss von Stickstoff lässt es schön gestreift und rosa erscheinen.

576 Sarasin[1]) hat dagegen nachzuweisen versucht, dass auch reines Sauerstoffgas die Phosphorescenzerscheinung zeigt. Er hat die Entladung zwischen zwei kleinen, 20 cm von einander entfernten, kreisförmigen Elektroden von Messing, Platin oder Silber übergehen lassen, welche an Messingstielen in der Mitte des Tellers einer Luftpumpe und senkrecht darüber in dem oberen Theile der auf den Teller gesetzten Glasglocke befestigt waren. Die Glocke wurde bis auf 1 mm Druck evacuirt, mit gewöhnlichem Sauerstoff gefüllt, wieder evacuirt und dann aus einem Behälter mit chemisch reinem, elektrolytisch dargestelltem Sauerstoff gefüllt. Bei einem Druck von 3 bis 1 mm zeigte sich das Nachleuchten; namentlich lange und intensiv bei einem Druck von 2 mm. Hierbei wird der Sauerstoff ozonisirt und von feinem Silberpulver absorbirt, welches auf den Elektroden ausgebreitet wird. Dasselbe verwandelt sich auf der negativen Elektrode in olivenfarbenes Silberoxyd, an der positiven scheint Suboxyd (?) zu entstehen. An anderen Stellen der Entladung findet keine Absorption statt. Mit der Absorption nimmt das Nachleuchten wesentlich ab.

Andere einfache Gase, wie Wasserstoff, Stickstoff, Jod, Chlor, auch sauerstofffreie zusammengesetzte Gase, Ammoniak, Kohlenwasserstoff und Chlorwasserstoffgas zeigen die Phosphorescenz nicht, ebenso wenig Luft. Dagegen erscheint sie sehr lebhaft, wenn unter die mit Kohlensäure und Kohlenoxyd gefüllte Glocke der Luftpumpe Nordhäuser Schwefelsäure in

[1]) Sarasin, Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. **34**, p. 243, 1869*. — In Röhren voll Sauerstoff von nicht vollkommener Reinheit, der aus chlorsaurem Kali dargestellt war, hatte schon E. Becquerel (La Lumière, **2**, p. 162 bis 196, 1867*) das Nachleuchten beobachtet.

einem Schälchen gebracht wird (s. §. 575). In Luft zeigt sich dann die Phosphorescenz schwach, in Wasserstoff gar nicht.

Bei Aufstreuen von Silberpulver auf die Elektroden nimmt hierbei die Phosphorescenz in einer Atmosphäre von Stickstoff schnell ab; das Silber schwärzt sich, so dass die Schwefelsäure zersetzt wird.

Schweflichte Säure leuchtet schwach nach; Salpetersäure, in den Gasen verdunstet, ebenso salpetrichte Säure, leuchten schwach; Stickoxydul leuchtet schon bei 8 bis 10 mm Druck mit gelber Farbe nach. Mit abnehmendem Druck verlängert sich die Dauer des Nachleuchtens.

Kohlensäure und Kohlenoxyd leuchten ebenfalls nach und auch hier wird das Nachleuchten durch Silberpulver auf den Elektroden vermindert.

Die Gegenwart des Sauerstoffs scheint also zur Hervorbringung des Nachleuchtens erforderlich, sei es in freiem Zustande oder in Verbindungen, die durch die Entladung zersetzt werden und sich wegen des activen Zustandes des frei gewordenen Sauerstoffs unter Lichterscheinung während und auch nach dem Durchgange des Stromes sogleich wieder bilden. Nach Sarasin soll auch das matte Licht, welches z. B. bei Stickoxydul neben der eigentlichen Entladung das Vacuum erfüllt, dieser Lichtentwickelung entsprechen.

4. Abhängigkeit der Gasentladungen von Druck, der Gestalt der Elektroden und der Elektricitätszufuhr. Gasentladungen des Inductoriums und der galvanischen Säule.

577 Lässt man vor den Entladungen, sei es in einem elektrischen Ei von Glas oder Metall, vor welches man zweckmässig einen schmalen Spalt in der Richtung der Verbindungslinie der Elektroden stellt, sei es in einem Entladungsrohre, einen Spiegel um eine jener Verbindungslinie parallele Axe rotiren, so löst sich darin auch bei gleichförmiger und langsamer Zufuhr der Elektricität zu den Elektroden durch eine kleine Influenzmaschine die nahezu normale[1]) Entladung (vergl. §. 551) in einzelne Bilder auf, deren Abstände mit abnehmendem Druck bis zu einem gewissen kritischen Druck (0,5 bei 0,2 mm Quecksilberdruck) immer kleiner werden. Bei weiterer Verdünnung werden die Abstände wieder grösser, bis zuletzt keine Entladungen mehr durch die Apparate hindurchgehen.

Die Entladung der von der Influenzmaschine den Elektroden continuirlich zugeführten Elektricitätsmengen ist also discontinuirlich[2]). Die einzelnen Bilder der zwischen den Elektroden übergehen-

[1]) Bei grösseren Influenzmaschinen treten in Folge der auf ihren Nichtleitern angesammelten und der ersten Entladung folgenden Elektricitäten Complicationen ein, siehe Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 240, 1880*. — [2]) Weniger zweckmässig lässt man die Entladungsröhre selbst um eine auf ihrer Längs-

den Entladungen sind ganz scharf und einfach, durch dunkle Zwischenräume von einander getrennt; sie erscheinen nicht breiter als die Entladung selbst und sind nicht von kleineren Partialentladungen begleitet. Bei etwas höheren Drucken (5 mm und mehr) zeigen sie sich als ganz scharf gezeichnete Lichtlinien. Nur das Bild des Glimmlichtes an der negativen Elektrode erscheint bei sehr schwachen Drucken zuweilen ein wenig verlängert, ohne dass indess die einzelnen Bilder einander berühren. Danach dauert an der negativen Elektrode die mit Glimmlicht übergehende Entladung etwas länger an, als die von der positiven Elektrode ausgehende Entladung. In den vorliegenden Fällen finden also continuirliche elektrische Entladungen im luftverdünnten Raume nicht statt, und zur Erzeugung jeder solchen Entladung ist eine bestimmte, endliche Spannungsdifferenz erforderlich.

578 Die Beobachtung der Entladungen im rotirenden Spiegel bietet zugleich ein Mittel, die bei jeder Einzelentladung übergehenden Elektricitätsmengen zu messen. Wir untersuchen zuerst die Verhältnisse oberhalb des kritischen Druckes, unterhalb welches die Spiegelbilder der Entladungsabstände wieder zunehmen. Hierzu habe ich im Verein mit R. Rühlmann[1]) den folgenden Apparat verwendet.

In eine Hülle von Messing *A*, Fig. 192, von etwa 12 cm Durchmesser und 16 cm Länge sind durch zwei Tubuli *B* und *C* zwei Glasröhren eingekittet, durch welche zwei Drähte hindurchgehen, die im Inneren zwei gleich grosse, kugelförmige Elektroden von etwa 3 bis 5 mm Durchmesser tragen. Die Drähte sind durch die isolirten Quecksilbernäpfe *J* und *K* und durch gleich lange und dicke, isolirte Drähte mit den beiden Conductoren einer Elektrisirmaschine verbunden. Durch die an der Messinghülle angebrachte Röhrenleitung *FG* kann dieselbe luftleer gemacht und sodann durch Hahn *G* mit einem beliebigen Gase gefüllt werden. Durch zwei diametral in der Hülle gegenüber liegende Fenster *D* kann die Entladung beobachtet werden.

Vor dem einen Fenster rotirt ein Spiegel VIII. Da in Folge der Unregelmässigkeiten der Erregung der Elektricitäten bei jeder Drehung der Scheibe der Maschine die in dem Spiegel beobachteten Abstände der einzelnen Entladungsbilder unregelmässig erscheinen, so wird derselbe auf die Axe der Maschine selbst aufgesetzt, welche der Verbindungslinie der Elektroden parallel gestellt wird. In ihm werden durch ein Fernrohr VII die Entladungen beobachtet. Der Abstand derselben ergiebt sich, wenn man das Objectivglas des Fernrohrs durch einen Verticalschnitt in zwei Hälften theilt und die eine Hälfte des Glases durch

---

richtung senkrechte Axe rotiren, wobei man eine Reihe einzelner Bilder derselben sieht. Lavaud de Lastrade, Compt. rend. 68, p. 621, 1869*.

[1]) G. Wiedemann und R. Rühlmann, Math.-phys. Ber. der k. Sächs. Ges. der Wissensch. 1871, 20. Oct.*; Pogg. Ann. 145, p. 235, 364, 1872*.

eine mit Maassstab und Nonius versehene Schraubenvorrichtung so lange verschiebt, bis die in jener Glashälfte beobachtete Hälfte des Entladungsbildes um den Linearabstand zweier Entladungen verschoben ist, das

Fig. 192.

Bild der Gesammtentladung also wie vor der Verschiebung der Glashälfte erscheint. Die Zahl der in der Zeiteinheit erfolgenden Entladungen ist dem Abstande der Bilder umgekehrt proportional. Wird zugleich die Elektricitätsmenge I gemessen, welche die Elektricitätsquelle während der Zeiteinheit liefert, indem man die Leitungsdrähte derselben nach Loslösung des Entladungsapparates oder unter Einschaltung desselben mit einem Spiegelgalvanometer verbindet, dessen Multiplicator aus Kupferdraht mit dickem Kautschuküberzug besteht, so kann man mittelst Division dieser Menge durch die Zahl der Entladungen die in jeder Entladung zwischen den Elektroden übergeführte Elektricitätsmengen bestimmen.

Beispielsweise führen wir nur folgende, für trockene und kohlensäurefreie Luft geltenden Bestimmungen an, bei denen I die Stromintensität, y den (doppelten) Abstand zweier Entladungsbilder bezeichnet. Denselben sind die Resultate beigefügt, welche erhalten wurden, wenn einmal die positive Kugel mittelst des Quecksilbernapfes L zur Erde abgeleitet, die negative mit der Elektrisirmaschine verbunden war, und dann umgekehrt die negative Kugel abgeleitet war.

Druck p	I	Beide Kugeln isolirt y			$I = 40$	Positive Kugel abgeleitet y		Negative Kugel abgeleitet y	
		I	II	Mittel		I	$I = 40$	I	$I = 40$
15,2	39,0	4,3	4,8	4,5	4,1	5,9	5,8	7,6	7,6
23,8	40,5	6,0	6,1	6,1	5,9	7;2	7,3	10,2	10,2
37,6	41,0	7,5	7,5	7,5	7,7	8,2	8,4	13.4	13,7
54,7	40,5	9,1	9,1	9,1	9,2	10,1	10,2	16,2	16,4
67,7	40,0	10,0	10,3	10,1	10,0	11,6	11,6	19,4	19,4
81,1	39,5	11,7	12,0	11,1	11,8	12,4	12,3	21,3	21,5

579 Die Curven, Fig. 193 und 194, geben den Gang der Erscheinung für verschiedene Gase, wenn beide Elektroden isolirt mit der Elektrisirmaschine verbunden waren oder die negative abgeleitet war. Die Abscissen bezeichnen den Druck in Millimetern, die Ordinaten den Abstand der einzelnen Entladungsbilder.

Fig. 193.

Fig. 194.

Aus diesen und ähnlichen Versuchen folgt:

Die Elektricitätsmengen, welche zur Entladung zwischen zwei Elektroden, die durch eine constante schwache Elektricitätsquelle geladen werden, erforderlich sind, sind von der Natur des Metalls der Elektroden unabhängig, so lange nur das Gas an der Entladung Theil nimmt.

Mit wachsendem Druck nehmen diese Elektricitätsmengen von einem gewissen Druck an erst schneller, dann langsamer zu. Von etwas höheren Drucken (20 mm Quecksilber) an wachsen sie proportional der Zunahme des Druckes. Dieselben sind bei etwas höheren Drucken der Reihe nach grösser für Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlensäure, Luft, Stickstoff.

Bei Ableitung der positiven Elektrode sind die zu einer Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen etwas grösser, als wenn beide Elektroden isolirt mit der Elektrisirmaschine verbunden sind; bei Ableitung der negativen Elektrode sind dieselben noch sehr viel grösser, als bei Ableitung der positiven Elektrode.

Bei grösseren Abständen zweier ungleich grossen, kugelförmigen Elektroden ist die zur Erzeugung einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge kleiner, wenn die grössere Kugel als positive Elektrode, wie wenn sie als negative Elektrode verwendet wird. Dabei nähert sich bei zunehmender Entfernung der Elektroden die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge bald einem Maximum, wenn die grössere Kugel positiv ist; dagegen steigt sie bedeutend an, wenn die grössere Kugel als negative Elektrode dient.

580 Aus den oben angeführten Versuchen folgt, dass zur Einleitung einer Entladung in der Gasschicht an der positiven Elektrode ein grösserer Antrieb auf die auf der Flächeneinheit aufgehäufte Elektricität erforderlich ist, als an der negativen Elektrode.

Es mögen die Entladungen zwischen zwei kugelförmigen Elektroden von den Radien $a > b$ stattfinden, deren Verbindungsdrähte mit der Elektrisirmaschine zu vernachlässigen seien. e_a und e_b seien die auf ihnen befindlichen Elektricitätsmengen, also $A = e_a/4a^2\pi$, $B = e_b/4b^2\pi$ die mittleren Dichtigkeiten derselben, P, sowie $R_a < R_b$ Constante, Δ der Abstand der gegenüberliegenden Punkte der Kugeln, so sind die Dichtigkeiten der letzteren nach Plana (Bd. I, §. 93):

$$\sigma_a = \frac{e_a}{4a^2\pi} \frac{R_a}{P + \log\frac{a}{\Delta}}, \qquad \sigma_b = \frac{e_b}{4b^2\pi} \frac{R_b}{P + \log\frac{b}{\Delta}}.$$

Sind die Kugeln gleich gross und ist die eine von ihnen zur Erde abgeleitet, die andere allein mit der positiven oder negativen Elektricitätsquelle verbunden, so wird die erstere nur durch Influenz elektrisch. Bei einer Ladung der nicht abgeleiteten Kugel mit der Elektricitätsmenge e_a wird die abgeleitete durch Influenz mit der Elektricitätsmenge $e_b = e_a/n$

geladen, wo $n > 1$. Da die Fernewirkung beider Elektricitäten die gleiche ist, so müssen wir annehmen, dass der Vertheilungscoefficient n derselbe bleibt, mag die Elektricität e_a positiv oder negativ sein.

Die Dichtigkeit σ_b ist dann auch kleiner als σ_a. Nach Bd. I, §. 76 ist der Antrieb, welchen die Elektricitätsmenge Eins auf einer Stelle der Oberfläche eines Körpers nach aussen erfährt, wenn die Dichtigkeit daselbst σ ist, gleich $4\pi\sigma$. Dieser Antrieb ist also auf der abgeleiteten Kugel kleiner. Ist zum Beginne der Entladung ein bestimmter Antrieb auf die an der Ausgangsstelle der Entladung aufgehäufte Elektricitätsmenge erforderlich, so wird derselbe auf der mit der Elektricitätsquelle verbundenen Kugel eher erreicht, als auf der abgeleiteten. Finden also die Entladungen bei gleicher Elektricitätszufuhr in kürzeren Intervallen, also bei Ladung mit kleineren Elektricitätsmengen statt, wenn die mit dem Conductor verbundene Kugel negativ ist, so muss in diesem Falle der Antrieb an dem kritischen Punkt der geladenen Elektrode, von welchem die Entladung ausgeht, kleiner sein, als wenn sie positiv ist.

Ist die Potentialfunction aller freien Elektricitäten auf die Einheit der Elektricität an der kritischen Stelle V, die Normale daselbst N, so ist der Antrieb auch gleich dV/dN. Man wird danach auch sagen können, dass unter sonst gleichen Verhältnissen zum Beginne der Entladung an dem kritischen Punkte der positiven Elektrode ein grösseres Potential erforderlich ist, als an der negativen.

581 Man könnte den Unterschied in der Zahl der Entladungen bei positiver oder negativer Elektrisirung der nicht abgeleiteten Elektrode auf die verschiedenartige Elektricitätszufuhr in beiden Fällen schieben, da, wie aus dem zirpenden Geräusch wahrzunehmen ist, auch die Elektricität der Scheibe der Elektrisirmaschine, sowohl der Influenzmaschine, wie der gewöhnlichen, zu den Kämmen der Conductoren intermittirend übergeht. Dieser Uebergang kann beiderseits in verschiedenen Rhythmen erfolgen, welche sich auf den Entladungsapparat übertragen könnten. Indess lässt sich dieser Einwand dadurch widerlegen, dass man mit der isolirten Elektrode ein Elektrometer (z. B. ein Henley'sches Quadrantelektrometer) direct verbindet oder eine Metallplatte, welcher eine zweite mit einem Elektrometer verbundene gegenübersteht, in der je nach der Entfernung grössere oder kleinere Elektricitätsmengen gebunden werden, so dass man dadurch die Angaben des Elektrometers beliebig verkleinern kann [1]). Bei gleichförmiger Drehung der beweglichen Scheibe der Maschine ist dann das an dem Elektrometer abzulesende Potentialniveau der Elektricität an der isolirten Elektrode immer kleiner, wenn dieselbe negativ ist, auch wenn das zwischen der abgeleiteten Elektrode und der Erde eingeschaltete Galvano-

---

[1]) Macfarlane, Trans. Roy. Edinb. Soc. 28, p. 634, 1878*; Beibl. 3, p. 429*.

meter den Durchgang gleicher Elektricitätsmengen durch den Entladungsapparat anzeigt. Dasselbe Verhältniss bleibt bestehen, wenn man mit der isolirten Kugel kleinere oder grössere Conductoren verbindet, während deren Ladung bis zur Funkenbildung eine grosse Anzahl intermittirender Uebergänge an den Kämmen der Maschine erfolgen muss, so dass die in jedem einzelnen derselben zu dem Conductor der isolirten Elektrode gelieferte Elektricitätsmenge keinen Einfluss hat.

Auch wenn man zwischen die Conductoren der Maschine, auch einer grösseren Maschine, deren Belegungen wie ein kleinerer oder grösserer Condensator wirken, in welchem sich die etwa stossweise übertretenden Elektricitäten ansammeln, und den Entladungsapparat feuchte Schnüre einschaltet, durch welche die Elektricitäten den Elektroden nur langsam zuströmen, zeigen sich unverändert diese Unterschiede [1]).

Aehnliche Resultate hat später auf einem andern Wege Röntgen [2]) 582 erhalten. Der Strom einer aus zwei mit Schwefelsäure gefüllten Glasflaschen hergestellten Batterie wurde zwischen einer engen Glasröhre voll Glycerin mit verschiebbaren Elektroden und einem Entladungsapparat verzweigt. Derselbe bestand aus einem unten in eine vergoldete Nähnadel endenden, in den Recipienten einer Luftpumpe von oben eingesetzten Metallstab, unter welchem in 19,3 mm Abstand conaxial eine 132 mm grosse, wohlisolirte, durch ein Spiegelgalvanometer mit vielen Drahtwindungen zur Erde abgeleitete polirte Messingscheibe lag. Die Nähnadelspitze war mit einem nach Art des Thomson'schen Elektrometers construirten Elektrometer verbunden. Durch Verstellen der Elektroden in der Glycerinröhre konnte die durch den Entladungsapparat gehende Elektricitätsmenge variirt werden.

Auch hier beginnt die Entladung erst bei einem bestimmten Potential P, welches von Nebenumständen, Staubtheilchen u. s. f. abhängt. Nach Beginn der Entladungen kann man den Glycerinwiderstand und somit auch das Potential bis zu einem Minimum P_{min} vermindern, wobei die Entladung und Ablenkung des Galvanometers aufhört.

Wie bei meinen Versuchen wächst unter einer gewissen Grenze (200 mm Quecksilberdruck) das Potential P_{min} mit wachsendem Druck D zuerst ziemlich schnell, dann nahezu proportional der Druckzunahme. So war z. B. in trockener, kohlensäurefreier Luft:

D	615	499	385	198	68	29	10,9	7,1
P_{min}	639	577	503	402	301	258	198	189

Die entladene Elektricitätsmenge E nimmt dabei langsamer zu, als die Differenz Δ des zum Beginn der Entladung erforderlichen Potentials P und des Minimalpotentials P_{min}, als das „disponible Potential". So war z. B. bei 51,8 mm Druck:

---

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **20**, p. 760, 1883*. — [2]) Röntgen, Gött. Ber. **1878**, p. 390*; Beibl. **2**, p. 419*.

P	1462	1727	2004	2199	2349	2487
Δ	0	265	542	737	887	1025
E	0	71	171	271	371	471.

Bei wachsendem Druck D nimmt die durch eine bestimmte Potentialdifferenz entladene Elektricitätsmenge E erst schneller, dann langsamer zu. So war, wenn $P = 3684$ war,

$D =$	641,2	466,4	391,0	294,0	203,4	109,7
$E =$	0	41,5	65	105	192	522

Bei constantem disponiblen Potential Δ nimmt bei wachsendem Druck die entladene Elektricitätsmenge noch schneller ab. So war für $\Delta = 1000$

$D =$	391	294	203,4	109,7	51,8
$E =$	71	79	106	194	450

Bei verschiedenen Gasen sind die Minimalpotentiale bei der Entladung, welchen wir die Producte W aus den Weglängen der Molecüle und dem Minimalpotential beifügen, die folgenden

		H	O	CO	CH_4	N_2O	CO_2
$D = 205$ mm	$P_{min} =$	1296	2402	2634	2777	3188	3287
$D = 110$ „		1174	1975	2100	2317	2543	2655
$D = 205$	$10^4 WP_{min} =$	240	254	259	236	217	224
$D = 110$		218	209	207	197	173	181

Das Minimalpotential ist also nahe umgekehrt proportional den Weglängen. Da die Weglängen mit den Brechungsexponenten und letztere mit den Dielektricitätsconstanten in Beziehung stehen, so ist im Allgemeinen das Minimalpotential bei der Entladung (das Isolationsvermögen der Gase) um so kleiner, je grösser sein Vertheilungsvermögen ist.

Leuchtgas zeigt indess diese Uebereinstimmung nicht. In feuchter Luft ist das Minimalpotential, also die Isolationsfähigkeit grösser, als in trockner. Auch ist dasselbe bei negativer Ladung der Spitze kleiner.

583 In den Entladungsröhren, Spectralröhren u. s. f. gestalten sich die Verhältnisse der für die Einleitung einer Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen etwas anders, als in freien Räumen, da sich die Glaswände elektrostatisch laden und diese Ladungen auf die Elektricitäten der Elektroden zurückwirken. Die Versuche hierüber sind von mir ganz ähnlich wie die §. 578 beschriebenen ausgeführt worden, indem die Entladungsröhre, am besten eine Spectralröhre, parallel der den rotirenden Spiegel tragenden Axe der Influenzmaschine aufgestellt wurde und ihre Spiegelbilder mittelst der heliometrischen Vorrichtung beobachtet wurden [1]).

---

[1]) G. Wiedemann, Math.-phys. Ber. d. k. Sächs. Ges. d. Wissensch. 1876, p. 1*; Pogg. Ann. 158, p. 35, 252, 1876*.

584 Aus diesen Versuchen folgt zunächst das gleiche Resultat, wie bei der Entladung zwischen zweien in einem grösseren Raum einander gegenüber stehenden Elektroden. Die Elektricität gleicht sich in einzelnen, äusserst kurze Zeit dauernden Entladungen zwischen den Elektroden aus. Und zwar ist, wenn die gesammten, in der Zeiteinheit durch den Entladungsapparat hindurchgegangenen Elektricitätsmengen gleich sind, die bei Ableitung der positiven Elektrode in jeder Entladung entladene Elektricitätsmenge kleiner, als bei Ableitung der negativen Elektrode, so dass also die zur Einleitung einer Entladung für die positive Elektricität erforderliche Ladung grösser ist, als für die negative.

Sodann nähert sich bei zunehmenden Drucken die bei jeder Entladung übergeführte Elektricitätsmenge zuerst schnell, dann langsamer einem bestimmten Werth, welcher bei etwa 20 bis 30 mm Druck erreicht ist. Bei etwas weiter gesteigertem Druck wächst die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge wesentlich schneller und nimmt dann ziemlich proportional mit dem wachsenden Drucke zu.

Betrachtet man hierbei die äussere Erscheinung der Entladungen, so breitet sich bei geringen Drucken die positive, wie die negative Entladung zuerst ziemlich gleichmässig nach allen Seiten nebelartig aus; bei stärkeren Drucken zieht sie sich gegen die Elektrode nach und nach zusammen, concentrirt sich dabei auf der der verbindenden Glasröhre zugekehrten Seite und bildet so allmählich ein gegen letztere hin sich erweiterndes Conoid, in welchem indess bei nicht allzu hohem Druck noch keine Metallentladungen, weder direct noch durch das Spectroskop, wahrzunehmen sind. Dieses Conoid verdichtet sich bei stärkerem Druck, namentlich an der positiven Elektrode, auf einen immer kleineren Ausgangspunkt und wird immer dünner, bis es zuletzt einen feinen, scharf gezeichneten, in die Röhre hineinlaufenden Strahl bildet, während die Entladung an der negativen Elektrode immer noch eine etwas grössere Ausdehnung bewahrt. Bei der Ableitung der einen oder der anderen Elektrode der Maschine ändern sich die Erscheinungen ein wenig. Im Allgemeinen verengt sich bei Ableitung der negativen Kugel das Conoid an der positiven Elektrode des Entladungsapparates zu einem feineren Strahl, während an der negativen die nebelartige Entladung um die Elektrode selbst concentrirt und das gegen die Röhre gerichtete Conoid diffuser und dunkler wird. Bei Ableitung der positiven Elektrode der Maschine wird bei kleinen Drucken das Conoid an der positiven Elektrode des Entladungsapparates dunkler und diffuser, während an der negativen die nebelartige, nach allen Seiten gehende Entladung mehr conoidisch gegen die Verbindungsröhre gerichtet und schärfer begrenzt erscheint.

Der helle Lichtstrahl im Verbindungsrohr selbst rückt bei Ableitung der positiven Elektroden der Maschine und des Entladungsapparates bei Drucken von etwa 2 mm in einem scharf begrenzten Strahl ein wenig in die negative Glaskugel hinein; unter höheren Drucken, wo er bei

isolirter Verbindung beider Elektroden des Entladungsapparates mit denen der Maschine bis in die negative Kugel hineinragt, zieht er sich durch Ableitung der positiven Elektrode bis an das Glasrohr, durch Ableitung der negativen Elektrode bis 2 bis 3 mm in das Glasrohr hinein und ist dabei stets an seinem Ende scharf begrenzt. Bei längeren und engeren Röhren und höheren Drucken (50 mm) ist in letzterem Fall nur ein grösseres oder kleineres Stück des Rohres von der positiven Elektrode an hell beleuchtet, während der der negativen Elektrode zugekehrte Theil desselben dunkler erscheint. Die Uebergangsstelle zwischen dem hellen und dunklen Theil rückt bei zunehmendem Druck immer weiter gegen die positive Elektrode vor.

585 Abgesehen von den oben erwähnten Unregelmässigkeiten liegen die Curven, welche für die Röhren von gleichem Querschnitt, aber verschiedener Länge, die Abhängigkeit der Abstände der Entladungen vom Druck darstellen, sehr nahe an einander, so dass also im Allgemeinen die für eine Entladung erforderliche Elektricitätsmenge innerhalb gewisser Grenzen von der Länge des die Räume um die Elektroden verbindenden Rohres unabhängig ist.

586 Auch bei verschieden weiten Röhren ändert sich mit Zunahme des Querschnittes die für eine Entladung erforderliche Elektricitätsmenge innerhalb gewisser Grenzen nur wenig, sowohl bei flachen, wie bei kreiscylindrischen Röhren.

Endlich sind auch die für eine Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen bei verschieden weiten, kugelförmigen, die Elektroden umgebenden Glashüllen innerhalb gewisser Grenzen nicht bedeutend von dem Radius derselben abhängig. Nur bei kleineren Glashüllen werden jene Elektricitätsmengen kleiner; wie schon an der Form der Entladung ersichtlich ist, in Folge der grösseren Nähe der in der Verbindungsröhre angehäuften, weniger dichten Elektricitäten.

Endlich sind, ebenso wie bei den Entladungen im freien Gasraume, bei gleichem Druck und gleicher Stromintensität die Entladungsabstände in der Luft grösser, als im Wasserstoff.

587 Die Begründung der soeben mitgetheilten Erfahrungen lässt sich im Allgemeinen aus den schon abgeleiteten Sätzen entnehmen.

Werden die Elektroden der Entladungsröhre mit den Zuleitern der Elektrisirmaschine verbunden, so laden sich bald die ihnen gegenüber stehenden Wände der umhüllenden Glaskugeln mit der gleichnamigen Elektricität, welche sich mit abnehmender Dichtigkeit auch bis in die Verbindungsröhre der Glaskugeln ausbreitet (s. w. u.).

Bei sehr geringen Drucken des Gases bedarf es zu jeder einzelnen Entladung nur einer geringen Ladung der Elektroden; die Ladung der

Glaskugeln kann nur wenig dicht, ebenso der Abfall der Elektricitäten im Verbindungsrohr nur klein sein. In diesem ist also, namentlich nahe den Glaskugeln, die elektrische Dichtigkeit nur wenig von der Dichtigkeit der Elektricität auf letztern verschieden. So geht die Entladung ziemlich gleichmässig nach allen Seiten von den Elektroden aus. Da ausserdem eine gleichmässig elektrische Hülle auf einen elektrischen Punkt im Innern nicht wirkt, können die von den Elektroden sich entfernenden elektrisirten Gastheile die Glaskugeln ziemlich vollständig erfüllen. — Wird der Druck stärker, also die zur Entladung erforderliche Elektricitätsmenge grösser, so fällt von der die Elektrode umgebenden Glashülle die Spannung der Elektricität an den Glaswänden der Glasröhre schneller bis zur zweiten Elektrode ab, die Elektroden sind nicht mehr überall von nahezu gleichförmig geladenen Wänden umgeben. Hierdurch wird auch die Vertheilung der Elektricität auf der Elektrode vor der Entladung geändert; sie wird bei gleicher Gesammtladung auf der der Röhre zugekehrten Seite dichter. An letzterer Stelle wird also bei weiterer Elektricitätszufuhr eher das zum Beginn der Entladung erforderliche Maximum erreicht, als an den anderen Stellen der Elektrode, und die Entladung geht nur von jener Stelle aus. Da sich aber bei dieser Vertheilung zugleich dieses Maximum unter gleichen Bedingungen an der betreffenden Stelle bei einer kleineren Gesammtmenge der Elektricität herstellt, so muss, wenn mit gesteigertem Druck jene Stelle immer kleiner wird, die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge immer langsamer wachsen; die Entladungscurve nähert sich also mehr und mehr dem Parallelismus mit der Abscissenaxe; ihre Ordinaten nähern sich einem constanten Werth. Ist endlich die Ausgangsstelle der Entladungen bei zunehmendem Drucke auf ein Minimum beschränkt, so sind bei noch mehr gesteigertem Drucke letzterem entsprechend wieder fortschreitend grössere Elektricitätsmengen zum Beginn einer Entladung erforderlich; die Entladungscurve steigt wieder schneller an.

Da nun bei Ableitung der negativen Elektrode überhaupt die zur Erzeugung einer Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen grösser sind, als bei Isolation beider Elektroden oder Ableitung der positiven, so müssen in ersterem Falle diese Verhältnisse stärker hervortreten, als in den letzteren Fällen.

Kann man die soeben betrachteten secundären Umstände, die Wirkung der im Verbindungsrohr allmählich abfallenden Elektricitäten und die Wechselwirkung der entgegengesetzten Elektricitäten in der Umgebung beider Elektroden, vernachlässigen, so ist die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge bei constantem Druck nur von den Verhältnissen der Umgebung der Elektroden selbst bedingt. Dann muss dieselbe von der Länge und dem Querschnitt des Verbindungsrohres unabhängig sein, wie es die Versuche innerhalb gewisser Grenzen ergeben.

Da endlich, wie schon erwähnt, die Kraft, welche auf einen elektrisirten Punkt im Innern einer kugelförmigen, im vorliegenden Fall gleichnamig elektrischen Hülle ausgeübt wird, bei gleichförmiger Vertheilung der Elektricität auf der Hülle gleich Null ist, so muss auch, wenn sich die Hülle einmal geladen hat und wenn nicht secundäre Umstände auftreten, die zu einer Entladung erforderliche Elektricitätsmenge von dem Radius derselben unabhängig sein. Diesem Resultat entsprechen im Allgemeinen die Beobachtungen. Dass bei engeren Hüllen relativ kleinere Elektricitäten erforderlich sind, hat seinen Grund in der grösseren Nähe der schnell abfallenden Elektricitäten der Verbindungsröhre an der Elektrode, wodurch die oben erwähnten Bedingungen wesentlich abgeändert werden.

Bei verschieden grossen Elektroden muss, wenn die Entladung nach allen Seiten gleichmässig ausgeht und die Spannung der freien Elektricitäten auf allen Punkten der Elektrode die gleiche ist, die zu jeder einzelnen Entladung erforderliche Elektricitätsmenge der Oberfläche der Elektroden proportional sein, wie dies von Hittorf für cylindrische Elektroden in cylindrischen Glashüllen bewiesen worden ist (siehe weiter unten).

588 Schon §. 584 haben wir angedeutet, wie sich bei gesteigertem Druck und Entladungsantrieb das äussere Ansehen der Entladungen ändert. Aehnliche Einflüsse hat eine Steigerung der bei jeder Entladung übergehenden Elektricitätsmengen.

Um einen Ueberblick der Erscheinungen zu geben, wollen wir einige Versuche von Wüllner[1]) in dieser Beziehung mittheilen.

In einem 75 mm langen, mit Luft erfüllten Rohr mit conaxialen Drahtelektroden erscheint beim Durchleiten der alternirenden Ströme eines Inductoriums bei 5 mm Druck die Röhre mit rothem, abwechselnd von der einen oder anderen (positiven) Elektrode ausgehenden Licht erfüllt, welches von der Kathode durch den dunklen Raum getrennt ist. Die Einschaltung eines Condensators in die Schliessung ändert nichts. Das Licht zeigt im Spectroskop das Bandenspectrum des Stickstoffs. Bei höherem Druck zieht sich die positive rothe Entladung gegen die Axe der Röhre zu einer feinen Lichtlinie zusammen und wird schwächer, das Spectroskop zeigt zuerst bei 50 bis 60 mm Druck die blauen und violetten Theile des Spectrums. Bei Einschaltung eines Condensators entstehen einzelne Funken, welche sich im rotirenden Spiegel je in einen geraden und einen gekrümmten Theil (wegen der alternirenden Entladungen) auflösen, und im Spectroskop neben den Banden die grünen hellsten Linien des Linienspectrums des Stickstoffs zeigen. Mit wachsendem Druck (140 mm) werden die durch den Condensator gebildeten Funken heller, das Spec-

[1]) Wüllner, Pogg. Ann. **135**, p. 497, 1868*, **137**, p. 37, 1869*, Jubelband, p. 32, 1874*.

trum ist allein noch das Linienspectrum. Bei noch höheren Drucken tritt dieses Verhältniss schon ohne Condensator ein.

Aehnlich verhalten sich andere Gase, z. B. Wasserstoff. Bei sehr hohen Drucken (über Atmosphärendruck) und Einschaltung grosser Batterien treten zu den Spectren der Gase noch die Linien des Stoffes der Elektroden und der Bestandtheile des Glases hinzu, das Spectrum wird dann nach und nach continuirlich, wie das eines glühenden festen Körpers. So erscheint z. B. im Wasserstoff ein schwarzer Streifen in der Gegend der Fraunhofer'schen Linie H, welcher ebenfalls bei noch stärkeren Entladungen verschwindet [1]).

589 Bereits §. 577 haben wir erwähnt, dass mit abnehmendem Druck bis zu einem bestimmten Punkt der in einem rotirenden Spiegel beobachtete Abstand der Entladungen abnimmt, dann aber bei weiterer Verdünnung wieder zunimmt, also der für den Beginn einer Entladung erforderliche Antrieb wieder wächst.

Auf anderem Wege hat dies C. Schultz [2]) gezeigt. Er theilte den Strom einer Influenzmaschine zwischen einem Funkenmikrometer und einer Geissler'schen Röhre, welche durch eine Quecksilberluftpumpe evacuirt wurde, und in der die Dichtigkeit der Luft aus der Zahl der Füllungen und Entleerungen des Recipienten der Pumpe und dem Verhältniss der Volumina des Rohres und des Recipienten (annähernd) bestimmt wurde. Es wurde die Schlagweite S am Funkenmikrometer gemessen, bei welcher bei verschiedenen Drucken p gerade in dem Entladungsrohr die Entladung erschien. Erstere entspricht bis zu einem gewissen Grade der Spannung der Elektricitäten auf den Elektroden des letzteren. So ergab sich z. B.:

Rohr 10 mm weit, 90 mm lang, dünne Platinelektroden		Rohr 0,5 mm weit, 90 mm lang, Platinelektroden		Rohr 16 mm weit, Elektroden in 2 mm Abstand	
p	S	p	S	p	S
30,5 mm	0,4 Lin.	11	0,4 bis 0,5	27	0,05
7	0,25	2,5	0,25 „ 0,35	6	<0,05
1,6	0,15	0,6	0,5	1,32	—
0,37	0,1	0,144	0,75 „ 0,2	0,064	0,1
0,085	0,1	0,034	1,25 „ 1,8	0,014	0,3
0,019	0,2 bis 0,3	0,008	1,5 „ 2,5	0,003	0,5 bis 0,7
0,004	0,4 „ 1	0,002	2,5 „ 3	—	—

[1]) Vergl. auch Versuche von Ferrini (Rend. Lomb. (2) **14**, 1881; Beibl. **5**, p. 464*. Ferrini und Pogliaghi, Luminosita dei Gas, Milano 1882, p. 177*) mit einer weit evacuirten Glaskugel, in welche in einem Meridiankreis zwei horizontale und eine obere verticale und im letzten Quadranten eine 45° resp. 135° von zwei anderen Elektroden entfernte kreisförmige Elektrode eingesetzt war. — [2]) C. Schultz, Pogg. Ann. **135**, p. 249, 1868*.

Von dem Druck von etwa 0,1 mm abwärts nimmt also die zur Erzeugung der Entladung erforderliche Spannung zu. Bei sehr engen Röhren tritt das zur Entladung erforderliche Minimum der Spannung schon bei etwas höheren Drucken ein, als bei weiteren. Mit dem Abstand der Elektroden wächst bis zu Drucken von 1 mm abwärts die zur Erzeugung einer Entladung erforderliche Spannung bedeutend.

Auch nach Warren de la Rue und Hugo Müller[1]) haben die Dimensionen der Glasgefässe auf den Druck der Minimalspannung Einfluss[2]).

590 Bei sehr starker Verdünnung bedarf es sehr grosser Spannungen, um durch die Entladungsröhren überhaupt Elektricität zwischen Metallelektroden überzuführen. Im völlig luftleeren Raume geht gar keine Elektricität über. Verbindet man ein Elektroskop mit dem Quecksilber eines nicht ganz luftleeren Barometers, den einen Pol einer andererseits abgeleiteten Volta'schen Säule von 300 Paaren mit einem oben in die Barometerröhre eingeschmolzenen Draht, so ladet sich nach Erman[3]) das Elektroskop. Ist das Barometer völlig luftleer und isolirt aufgehängt, so zeigt sich bei trockner Luft nicht die geringste Ladung. — In anderer Weise hat Gassiot[4]) dasselbe nachgewiesen, indem er eine Entladungsröhre mit sehr verdünnter Kohlensäure füllte und in eine seitlich an dieselbe angeschmolzene Kugel einige Stückchen von reinem Kalihydrat brachte. Die im Rohr erscheinende leuchtende Entladung der Inductionsströme verschwand völlig, als das Kalihydrat geschmolzen, durch Neigen des Rohres in demselben ausgebreitet und abgekühlt wurde, und so die letzten Reste von Kohlensäure absorbirt wurden. Beim Erhitzen des Kalis trat durch Bildung von Dämpfen die geschichtete Entladung wieder hervor.

Ganz dieselben Erscheinungen, die geschichtete Entladung und ihr Verschwinden, hat Gassiot[5]) beobachtet, als er seine Kupferzinkwasserbatterie von 3520 Zellen oder eine Batterie von 400 Grove'schen Elementen durch eine Entladungsröhre schloss, in welcher durch Absorption von Kohlensäure durch geschmolzenes Kali ein Vacuum hergestellt wurde. Goldblattelektroskope, welche an den Polen der Säule angebracht waren, bewahrten dann ihre Divergenz.

Auch in Röhren, die durch eine Geissler'sche Quecksilberluftpumpe evacuirt sind, kann man das Aufhören des Durchganges des Stromes nachweisen, wie zuerst Geissler (1857)[6]) bei einem Abstand der Elektroden

[1]) Warren de la Rue und H. Müller, Proc. Roy. Soc. **34**, p. 437, 1883*; Beibl. **7**, p. 473*. — [2]) Hiermit stimmen auch die Versuche von Eilh. Wiedemann über die Erwärmung bei der Entladung s. w. u. — [3]) Erman, Gilb. Ann. **11**, p. 163, 1882*. — [4]) Gassiot, Phil. Trans. 1858, **1**, p. 1*; Arch. Nouv. Sér. **10**, p. 58, 1860*. — [5]) Gassiot, Proceed. Roy. Soc. **10**, p. 36 and 393*; Arch. des sc. phys. et nat. Nouv. Sér. **10**, p. 58*; Pogg. Ann. **112**, p. 156, 1861*. — [6]) s. Wüllner, Pogg. Ann. **133**, p. 509, 1868*; ähnlich die Gebrüder Alvergniat, Compt. rend. **65**, p. 963, 1867*; Pogg. Ann. **133**, p. 191, 1868*.

von etwa 0,1 m, dann auch mit ihm Hittorf unter gleichzeitigem Erwärmen der Röhren (1865) bei einem Abstand von weniger als 2 mm nachwies.

591 Noch grössere Verdünnungen hat Hittorf[1]) erzielt, indem er Röhren von nur 5 bis 6 cm Länge durch ein mit wasserfreier Phosphorsäure gefülltes Rohr mit der Geissler'schen Pumpe verband und während des Evacuirens in ein eng anliegendes Glasrohr einsetzte, welches in einem weiteren Gefässe stand, in dem Schwefel (bei 447° C.) oder Schwefelphosphor (bei 530° C.) siedete. Nach dem Erwärmen wurde das Rohr zugeschmolzen. Hierzu war das Verbindungsrohr mit dem Phosphorsäurerohre an einer Stelle verengt und mit einer Platindrahtschlinge umwickelt, die durch einen Strom glühend gemacht und zusammengezogen wurde (Fig. 195).

Fig. 195.

Wird hier durch sehr starke Spannungen ein Durchgang des Stromes erzielt, so zeigt nicht nur die negative Elektrode Glimmlicht, sondern es erglänzt auch das Ende der positiven Elektrode; ist dieselbe aus einem dünnen Platindraht oder einer Kohlenspitze gebildet, so erglüht sie daselbst. Dabei wird sie zerstäubt, und von ihrem Material setzen sich Theile an der nächsten Glaswand ab. (Die Zerstäubungserscheinungen, namentlich an der negativen Elektrode, werden wir später besprechen.) Hierbei ist die Gestalt der Elektroden von Einfluss. Zwischen spitzen Elektroden besteht die Entladung bei viel grösserer Verdünnung fort, als zwischen stumpfen Elektroden[2]). — Ebenso geht auch bei sehr grossen Verdünnungen eventuell durch eine Röhre noch eine Entladung, wenn die Kathode eine Platte, die Anode eine Spitze ist, nicht aber im umgekehrten Fall[3]) (siehe den folgenden Paragraphen).

592 Die Erfahrungen der §§. 578 u. flgde. geben die Möglichkeit, durch Veränderung der Oberflächen der Elektroden eines Entladungsapparates zu bewirken, dass von einer Reihe abwechselnd gerichteter Ströme nur einseitig gerichtete durch einen Stromkreis hindurchgehen. Solche Ströme sind die des Inductoriums, von denen die Schliessungsströme

[1]) Hittorf, Pogg. Ann. **136**, p. 201, 1869*. — [2]) v. Waltenhofen, Pogg. Ann. **126**, p. 538, 1865*; Wien. Ber. **51** [2], p. 535. — [3]) Teall, Nature, **19**, p. 482, 1879*; Beibl. **3**, p. 526*.

langsamer verlaufen und deshalb an den Enden der Inductionsrolle eine geringere Potentialdifferenz erzeugen, als die Oeffnungsströme. Bei einem gewissen Abstand der Elektroden fliessen durch eine Luftstrecke, eine Entladungsröhre, beide Ströme, falls nicht der Schliessungsstrom zu langsam verläuft. Daher erscheint an beiden Elektroden in schneller Aufeinanderfolge positives und negatives Glimmlicht. Im rotirenden Spiegel gesehen werden die Entladungen in einzelne Bilder zerlegt, welche abwechselnd an derselben Elektrode positives oder Glimmlicht zeigen.

Aendert man aber die Grössenverhältnisse der Elektroden ab, so fliessen durch den Apparat nur die Oeffnungsströme. Hierzu überzieht Gaugain[1]) in seinem „Ventilei“ (oeuf soupape) die eine kugelförmige Elektrode eines elektrischen Eies bis auf eine sehr kleine Stelle an der der anderen zugekehrten Seite mit einer isolirenden Schicht, z. B. von Wachs, und lässt die andere kugelförmige Elektrode unbedeckt. — Einen ähnlichen Apparat hat auch P. Riess[2]) benutzt. Er ersetzte das elektrische Ei durch einen 100 mm hohen und 40 mm weiten, beiderseits offenen Glascylinder, auf dessen eines Ende eine Messingplatte gekittet war, die im Inneren des Cylinders eine Messingröhre trug. In diese konnte man einen Draht schrauben, der in einer Messingkugel von 10 mm Durchmesser endete. — Das andere Ende des Glascylinders war mit einer Glasplatte bedeckt, in die in der Mitte ein 0,5 mm dicker Platindraht eingekittet war, welcher auf der dem inneren Raum des Cylinders zugekehrten Seite zugleich mit der Glasplatte abgeschliffen war. Die Luft im Cylinder wurde durch einen an der Messingplatte befestigten Hahn bis auf 2 bis 3 mm Quecksilberdruck ausgepumpt.

Dient bei den Entladungen der Inductionsströme die überzogene Kugel des Eis oder der Platinstift des Riess'schen Apparates als positive Elektrode für die Oeffnungsströme, so wächst die durch ein Galvanometer gemessene Intensität der Ströme mit wachsender Verdünnung der Luft. — Dient die nicht überzogene Kugel des Eis oder die Platte des Apparates von Riess als positive Elektrode, so nimmt gleichfalls zuerst hierbei die Stromintensität zu, bei weiterer Abnahme des Luftdruckes nimmt sie aber allmählich bis zu Null ab, und endlich kehrt sich die Richtung der Ströme um. — Gaugain nennt deshalb ein so vorgerichtetes elektrisches Ei „Ventilei oder oeuf soupape“, da es bei einer gewissen Luftverdünnung die Inductionsströme nur in der Richtung von der bedeckten zur unbedeckten Kugel durchlassen soll[3]).

---

[1]) Gaugain, Compt. rend. **40**, p. 640, 1855*; Pogg. Ann. **95**, p. 163*; Compt. rend. **41**, p. 152, 1855*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. **96**, p. 177, 1855*. — [3]) Ueber das Doppelventil von Feddersen siehe bereits §. 183. — Statt dieser Luftventile verwendet Spottiswoode (Phil. Mag. [5] **13**, p. 353, 1882*; Beibl. **6**, p. 512*) auch eine mit Glycerin gefüllte Flasche, in welcher unten eine Platte, oben eine Spitze als Elektrode dienen. Schliesst man in den Entladungskreis eines Inductoriums neben einander zwei solche Flaschen, so geht durch die eine nur der Oeffnungs-, durch die andere nur der Schliessungsstrom, und zwar in der Weise, dass für letzteren die Spitze als positive Elektrode dient.

593 Ist in einem dieser Apparate die Luft auf 3 bis 4 mm Quecksilberdruck ausgepumpt und dient die kleinere Metallfläche als positive Elektrode für den Oeffnungsstrom, so ist die Lichterscheinung ganz dieselbe, wie wir sie §. 474 beschrieben haben. Dient aber die kleinere Metallfläche als negative Elektrode, so zeigt sich kein dunkler Raum, das röthliche positive Licht ist nicht mehr scharf begrenzt.

Man kann die einseitige Richtung der Ströme im Ventilei oder im Riess'schen Apparat, wenn die positive Elektrode die kleinere ist, die doppelsinnige Richtung, wenn sie die grössere ist, auch direct nachweisen, wenn man die Entladungen in einem rotirenden Spiegel beobachtet.

Schaltet man ein mit Jodkaliumkleister bestrichenes Papier zwischen zwei Platinspitzen in den Schliessungskreis des Inductionsstromes ein, so erscheint im zweiten Falle meist unter beiden Elektroden ein Jodfleck; im ersten Fall nur unter der als positive Elektrode dienenden Spitze.

Aehnlich, wie die Vergrösserung der einen Elektrode, wirkt auch der metallische Beschlag, welcher die eine Kugel einer Geissler'schen Röhre häufig bedeckt, wenn der in derselben enthaltene Metalldraht oft als negative Elektrode für den Inductionsstrom gedient hat [1]).

594 Aus den §§. 578 u. flgde. mitgetheilten Versuchen habe ich den Grund der Ventilwirkung folgendermaassen abgeleitet:

Ein durch irgend eine Elektricitätsquelle gelieferter, kurz andauernder Strom durchbricht bei mittleren Drucken nur dann ein verdünntes Gas, wenn die Spannungen der Elektricitäten an den Enden der Leitung einen bestimmten endlichen Werth erreichen. Ist die eine Elektrode bedeutend grösser als die andere, so bedarf es einer stärkeren Spannung zum Uebergang einer Entladung von der kleineren positiven zur grösseren negativen Elektrode, als zum Uebergang von der kleineren negativen zur grösseren positiven Elektrode. Folgt nun eine Reihe abwechselnd gerichteter Ladungen auf einander, die eine elektrische Spannung haben, welche zwischen jenen beiden Werthen liegt, so können nur die Entladungen zwischen den Elektroden übergehen, für welche die kleinere als negativer Pol dient.

Bei abwechselnd gerichteten Inductionsströmen, wie sie z. B. in der Inductionsspirale eines Inductoriums erzeugt werden, compliciren sich diese Erscheinungen dadurch, dass bei einer gleichen Gesammtmenge

---

[1]) Verbindet man das Ventil einerseits mit der alternirenden Elektricitätsquelle, anderseits mit der Collectorplatte eines Condensators, so dass es nicht in einen geschlossenen Stromkreis eingefügt ist, so glimmt nur, wenn die Platte des Ventils negativ ist, die Luft an derselben, nicht aber, wenn sie positiv ist, und nur im ersten Falle erreicht die negative Elektricität die gegenüberliegende Spitze. Dann ladet sich die mit dem Ventil verbundene Collectorplatte mit der Elektricität, die einem Strom von der Spitze des Ventils zur Platte entspricht.

der bewegten Elektricitäten die Oeffnungsströme schneller ansteigen als die Schliessungsströme, die Intensität dieser Ströme, abweichend von den Strömen einer Elektrisirmaschine, von den Widerständen der Leitung abhängig ist, und auch ein Theil der an den Elektroden angehäuften Elektricitäten eventuell sich rückwärts durch die Inductionsspirale selbst entladet.

Ist zuerst die kleinere Elektrode positiv für den Oeffnungsstrom, so bedarf es meist zu dem Uebergang der Elektricitäten einer so starken Ladung, dass überhaupt nur die Oeffnungsströme hindurchgehen können.

Ist die kleinere Elektrode aber für den Oeffnungsstrom negativ, so können bei stärkeren Drucken zunächst die zu einer Entladung erforderlichen Spannungen auch nur durch den Oeffnungsstrom geliefert werden, welcher sich bis zur hinlänglichen Ladung der Elektroden vollständig entwickeln kann. — Wird die Luft verdünnt, so bedarf es kleinerer Elektricitätsmengen. Wenn dann der Oeffnungsstrom bei seinem schnellen Ansteigen bis zum Maximum die Spannung besitzt, dass ein Theil der in ihm bewegten Elektricitäten von der kleineren positiven zur grösseren negativen Elektrode übergeht, so kann auch der Schliessungsstrom nachher eine, wenn auch schwächere, so doch genügende Spannung an den Elektroden liefern, dass umgekehrt ein Theil desselben in der ohnehin durch die erste Entladung veränderten und deshalb schon leichter zu durchbrechenden Gasschicht von der grösseren positiven zur kleineren negativen Elektrode übergeht. Dann kann die am Galvanometer gemessene Gesammtintensität der Inductionsströme bis Null abnehmen. Bei noch weiterer Verdünnung werden die zum Uebergang der Elektricitäten erforderlichen Spannungen immer kleiner, so dass bei dem schnellen Abfalle der Intensitäten des Oeffnungsstromes, bei dem langsamen Abfall und der längeren Zeit, in der die Intensität des Schliessungsstromes über einer gewissen Grösse bleibt, eine grössere Elektricitätsmenge durch letzteren von der grossen zur kleinen Elektrode übergeführt werden kann, als durch den Oeffnungsstrom in entgegengesetztem Sinne. Die Ablenkung der Nadel des in den Inductionskreis eingeschalteten Galvanometers kehrt sich dann um [1]).

---

[1]) Riess (Monatsber. d. Berl. Akad. 6. Aug. 1868, p. 515*; Pogg. Ann. **126**, p. 31, 1864*) hatte eine andere Erklärung dieser Erscheinung gegeben. Nach ihm geht bei der Ladung der Elektroden der explosiven Entladung durch einen Funken stets erst ein Glimmen der Elektroden, also eine Elektrisirung der eine jede derselben umgebenden Luft mit der Elektricität der betreffenden Elektrode und somit ein Forttreiben der Luft vorher. Diese elektrisirte Luft muss an jeder Elektrode bei der Funkenentladung durch die gleichnamige Elektricität der Elektrode selbst durchbrochen werden. Tritt aber ein entgegengesetzter Strom nach dem ersten, die Glimmerscheinung und Ladung der Luft erzeugenden ein, so soll dieser die letztere leichter durchbrechen.

Da nun namentlich an grösseren Flächen die Glimmerscheinung in verdünnter Luft viel leichter auftritt, wenn die Flächen negativ geladen sind, als bei positiver Ladung, so wird, wenn die Scheibe des Ventils abwechselnd als

Der Einfluss der verschieden grossen Elektroden auf den Durchgang der Entladung, welchen wir schon beim elektrischen Ei beobachteten, tritt auch hervor, wenn noch zugleich die Glaswände eine Einwirkung auf die Entladung ausüben. Zugleich beobachtet man hierbei eine Abhängigkeit der Schichtung des Lichtes von der Richtung der Entladung. Dies zeigt sich z. B. bei den Ventilröhren von Poggendorff[1]). Dieselben bestehen aus 30 bis 40 cm langen, etwa 3 cm weiten Glasröhren, welche an dem einen Ende einen 0,8 mm dicken Draht, am anderen Ende eine den Querschnitt der Röhre ausfüllende Scheibe von Aluminium als Elektroden enthalten und mit möglichst verdünntem Wasserstoffgas gefüllt sind. Lässt man durch eine solche Ventilröhre den continuirlichen Strom einer Influenzelektrisirmaschine fliessen, so ist das Licht ungeschichtet. Dient die Scheibe als positive Elektrode, so bildet es eine von der Scheibe bis über die Mitte der Röhre hingehende, weissliche Lichtsäule, welcher ein etwa 6 cm langer, dunkler Raum und eine bis zum negativen Drahtende gehende, 4 bis 5 cm lange, blaue Zone folgt. Ist der Draht die positive Elektrode, so bildet die Entladung eine schmale Säule, in der kein dunkler Raum sichtbar ist. — 595

Verzweigt man den Elektricitätsstrom zwischen zwei gleichen, in entgegengesetzter Lage neben einander liegenden Ventilröhren, so fliesst er nur durch diejenige, in welcher die Scheibe als positive Elektrode dient. Die Einschaltung von Widerständen in den einen oder anderen Zweig ändert diese Verhältnisse nicht.

Verbindet man die zu den Elektroden der Ventilröhre führenden Leitungsdrähte mit den Belegungen eines Condensators von nicht zu kleiner Capacität, also von nicht zu kleiner Oberfläche oder möglichst geringer Dicke der isolirenden Schicht, z. B. mit einem beiderseits mit Stanniol belegten Glimmerblatt, so werden die Entladungen discontinuirlich; es tritt eine Schichtung des Lichtes auf, die bei Einschaltung von grösseren Widerständen, z. B. längeren feuchten Schnüren, in die Schliessung verschwindet und dann erst bei stärkeren Ladungen hervortritt. Dieselbe zeigt sich nur deutlich, wenn die Scheibe als negative Elektrode dient. Statt der feuchten Schnüre kann man auch Geissler'sche Röhren und eine zweite Ventilröhre einfügen.

Bei der Verzweigung durch zwei entgegengesetzt liegende Röhren

---

negative und positive Elektrode dient, sich an derselben im ersten Falle das Glimmen zeigen, und sie nun den Strom leicht hindurchlassen, für den sie als positive Elektrode dient. — Die der Scheibe gegenüberstehende kleinere Fläche glimmt einmal ziemlich gleich leicht mit positiver und negativer Elektricität; und sodann ist die Menge der elektrisirten Luft entsprechend ihrer kleineren Oberfläche so viel kleiner, als an der Scheibe, dass die Wirkung an letzterer weitaus überwiegt.

In dichterer Luft glimmen grössere Flächen schwerer, so dass dann die Wirkung des Ventils nicht mehr hervortritt, sondern dasselbe nur wie jede Unterbrechungsstelle wirkt, durch welche jedesmal die dichteren Ströme leichter übergehen.

[1]) Poggendorff, Monatsber. d. Berl. Akad. 1867, 12. Dec., p. 801*.

geht jetzt entgegen dem Verhalten des continuirlichen Stromes die Entladung in der Röhre über, in welcher die Scheibe als negative Elektrode dient. Das Verhalten ist also dem gegen den Strom der Maschine gerade entgegengesetzt.

Unterbricht man hierbei den Entladungskreis noch durch eine Luftschicht, in der Funkenentladungen übergehen, so zeigt die Ventilröhre in beiden Lagen gleichmässig helles, ungeschichtetes Licht. Wird eine nasse Schnur eingefügt, und ist die Scheibe die positive Elektrode, so ist die Erscheinung bei kleinen Schlagweiten dieselbe, wie eben beschrieben. Dann aber nimmt mit Vergrösserung der Schlagweite das Licht ab, so dass nur das negative Ende des Rohres gelb leuchtet. Bei fernerer Vergrösserung der Schlagweite nimmt das Licht an Helligkeit zu. Es ist indess stets ungeschichtet. — Ist die Scheibe die negative Elektrode, so ist bei kurzer Schlagweite zuerst die Erscheinung dieselbe, wie bei der discontinuirlichen Entladung im ununterbrochenen Kreise; bei grösserer Schlagweite wird das Rohr dunkel, nur die Spitze des positiven Drahtes leuchtet, und auf der negativen Scheibe zeigt sich gelbes Fluorescenzlicht; bei noch grösserer Schlagweite treten am positiven Draht scharfe Schichten hervor, deren Zahl allmählich zunimmt, so dass sie die Röhre bis zur Hälfte erfüllen, dann aber durch den dunklen Raum von der mit Licht bedeckten negativen Scheibe getrennt sind. Bei immer grösser werdender Schlagweite verwaschen sich die Schichten wieder und die Lichtmasse wird fast continuirlich. — Bei Einschaltung von Widerständen, z. B. feuchten Schnüren, muss man zur Hervorbringung dieser Erscheinungen, namentlich bei kürzeren Schnüren, grössere Schlagweiten anwenden; bei grösseren Widerständen kann man die dunkele Periode schwer erhalten, und fast immer treten Schichten auf.

Wird hierbei der Strom zwischen zwei parallel und entgegengesetzt liegenden Ventilröhren verzweigt, so geht er durch die Röhre, in der die Scheibe als negative Elektrode dient.

Schaltet man statt der feuchten Schnüre Drahtrollen als Widerstände ein, so treten in Folge der Inductionserscheinungen complicirtere Erscheinungen und alternirende Ströme auf. Bei der eben erwähnten Verzweigung zeigen sich daher Lichtschichten in beiden Ventilröhren.

Gegen die Inductionsströme des Inductoriums verhalten sich die Ventilröhren, wie gegen die discontinuirlichen Ströme. Nur die Oeffnungsströme gehen in der Richtung hindurch, dass die Scheibe als negative Elektrode dient, und es zeigt sich dieselbe Erscheinung, wie beim continuirlichen Strom; dient sie als positive Elektrode, so leuchtet das negative Ende des Rohres gelb, und das ganze Rohr ist mit einem kaum geschichteten, violetten Lichtnebel erfüllt. Zugleich geht aber ein Theil des Schliessungsstromes mit hindurch.

Bei der Verzweigung geht der Oeffnungsstrom nur durch die Röhre, in welcher die Scheibe als negativer Pol dient; der Schliessungsstrom

geht durch die andere Röhre, wo also wiederum für ihn die Scheibe als negative Elektrode dient.

Aehnliche, nur noch complicirtere Erscheinungen beobachtet man, wenn eine Röhre durch trichterförmige Glaseinsätze in Abtheilungen getheilt ist. So liess schon Geissler zuweilen bei seinen Röhren beim Uebergang aus einer engeren Röhre in eine weitere Kugel erstere sich trichterförmig in die letztere hineinziehen. Holtz hat sodann diesen Röhren folgende Gestalt (Fig. 196) gegeben: 596

Fig. 196.

Eine gerade, etwa 60 cm lange, 15 mm weite Röhre, an deren Enden die Elektroden eingesetzt sind, ist durch eingeschmolzene Glastrichter, welche ihre capillaren Oeffnungen alle nach einer Seite kehren, in mehrere Abtheilungen getheilt. Sie ist mit einem höchst verdünnten Gase, am besten mit Wasserstoff, gefüllt.

Bei diesen Röhren bilden sich in den Trichtern secundär negative Elektroden, welche dem Uebergange des Stromes einen Widerstand darbieten. Die Röhren verhalten sich gegen die verschieden gerichteten Ströme verschieden, zeigen aber nicht für Ströme von verschiedenen Quellen dieselben Unterschiede, wie die Ventilröhren. — Sie bieten sowohl den Inductionsströmen des Inductoriums, als auch den continuirlichen und discontinuirlichen Strömen der Influenzmaschine einen geringeren Widerstand dar, wenn die Trichterspitzen der positiven Elektrode zugekehrt sind (positive Lage des Rohres). Bei Verzweigung der Ströme durch zwei in entgegengesetzter Lage befindliche Holtz'sche Röhren fliessen sie nur durch die positiv gelagerte. Bei den continuirlichen Strömen vermag man durch Einschaltung von gasigen oder feuchten Widerständen in den Zweig der positiven Röhre auch hier nicht die Entladung zur anderen Röhre überzuführen; bei den discontinuirlichen und Inductionsströmen, und namentlich bei Unterbrechung der Entladungskreise durch einen Funken, gelingt dies leichter.

Lässt man einen Inductionsstrom oder den Strom der Influenzmaschine durch die Doppelröhren, Fig. 197, gehen, so fliesst er je nach 597

Fig. 197.

a b d c

seiner Richtung durch *c* und *a* oder *d* und *b* und durch die mittlere Kugel im Winkel von 45⁰. Ströme von alternirender Richtung kreuzen sich in der Kugel und gehen abwechselnd durch *c* und *a* und *d* und *b* [1]).

Eine andere Röhre von Holtz [2]), Fig. 198 a, ist in der Mitte durch eine Scheidewand getheilt, welche von zwei etwas grösseren, nach den

Fig. 198 a.

Fig. 198 b.

entgegengesetzten Seiten trichterförmig sich verengenden Oeffnungen durchbrochen ist. Noch eine andere, Fig. 198 b, hat an beiden Enden nahe den Elektroden zwei solche Scheidewände, in denen die gleichgerichteten Trichter je in einer zur Röhrenaxe parallelen Linie liegen. Diese Röhren zeigen den Durchgang der abwechselnd gerichteten Ströme durch die einen oder anderen Trichter auf das Vollkommenste.

Die Lichterscheinungen und das Hervortreten der Schichten in diesen Röhren sind denen in den Ventilröhren ähnlich, wenn auch complicirter; indem dabei noch eine Verschiebung der Schichten zu erkennen ist. So laufen z. B. bei Anwendung von Inductionsströmen die Schichten in der positiven Lage mehr in die Trichterspitzen hinein und in der negativen gehen sie mehr nach der entgegengesetzten Seite.

598 Erwärmt man eine Poggendorff'sche Ventilröhre in der Mitte, während durch discontinuirliche Influenzströme in ihr Schichten entstehen, so werden dieselben nach Poggendorff (l. c.) schärfer, feiner, und namentlich an der positiven Elektrode (dem Draht) treten sehr viele neue, eng an einander liegende Schichten auf; bei der Abkühlung verschwindet dieser Einfluss fast ganz. — Auch bei Anwendung des Inductionsstromes zeigen sich beim Erwärmen schmale, scharfe Streifen.

Wird dagegen die eine Kammer einer Holtz'schen Röhre beim Durchgange von Influenzströmen erwärmt, so nimmt ziemlich gleich in beiden Lagen zuerst in der erwärmten Kammer die Zahl der Schichten

---

1) Daniel, Mondes 19, p. 537, 1869*. — 2) Holtz, Pogg. Ann. 155, p. 643, 1875*.

ab, in den nicht erwärmten aber in auffallender Weise zu. Bei der Abkühlung nimmt die Zahl der Schichten auch in der vorher erwärmten Kammer zu und seltsamer Weise bleibt diese Vermehrung der Schichten bis auf das Doppelte auch nach dem Erkalten bestehen; die Zahl derselben wächst aber vorübergehend noch bei jeder Erwärmung.

Bei Inductionsströmen verwandelt das Erwärmen die breiten Schichten der erwärmten Kammer in schmale; während in den anderen Kammern alle Schichten in einen gleichförmigen Nebel übergehen. Nach dem Erkalten zeigt die Röhre keine dauernde Zunahme der Schichten. Dieser Unterschied rührt von der bedeutenden Elektricitätsmenge her, die sich im Inductionsstrome bewegt; bei Anwendung schwächerer Inductorien verhalten sich die Röhren gegen die Inductionsströme, wie gegen die Ströme der Influenzmaschine.

599 Wir haben bisher vorausgesetzt, dass nur der Oeffnungsinductionsstrom die Elektroden in genügender Dichtigkeit ladet, um den luftverdünnten Raum der Entladungsröhren zu durchbrechen. Ist dies nicht der Fall, so können alternirende Entladungen in den Röhren auftreten. Dann erscheint an beiden Elektroden derselben Glimmlicht, und in einem parallel der Axe des Rohres rotirenden Spiegel haben die einzelnen, durch die Partialentladungen erzeugten Bilder desselben, welche man auch auf eine matte Glasplatte projiciren kann, abwechselnd an den entgegengesetzten Enden Glimmlicht. Legt man ein solches Rohr, in welchem alternirende Entladungen auftreten, zwischen die Pole eines Magnetes, so werden die entgegengesetzt gerichteten Ströme nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt (s. w. u.).

600 Ein Grund für das Auftreten alternirender Ströme bei Anwendung des Inductoriums ist z. B. eine sehr grosse Verdünnung der Luft. Füllte Gassiot[1]) seine Röhren nach dem Vorschlage von Andrews mit Kohlensäure und brachte in dieselben ein Stück Kali, welches die Kohlensäure, namentlich beim Erhitzen, allmählich absorbirte, so zeigte sich nach einiger Zeit eine Schichtung des Lichtes, welche bald bei weiterer Absorption der Kohlensäure völlig aufhörte. Dann erschien an beiden Elektroden Glimmlicht, und ein in den Schliessungskreis eingeführtes Galvanometer zeigte keine Ablenkung. Das schwache Licht in der Röhre wurde durch die Einwirkung des Magnetes in zwei Theile getheilt. — Bei noch weiterer Absorption hörte die Leitung des Stromes durch die Röhre ganz auf (vergl. §. 590).

Dasselbe Resultat erhielt noch einmal Fernet[2]), als er zwischen zwei vertical über einander gestellten Platindrähten in einer Glasglocke die Inductionsströme übergehen liess und allmählich die Luft bis auf

[1]) Gassiot, Phil. Trans. 1859, p. 147*. — [2]) Fernet, Compt. rend. 61, p. 257, 1865*.

2 bis 3 mm Druck auspumpte. In einem rotirenden Spiegel trennen sich die alternirenden Entladungen, deren jede Schichtungen besitzt, deren eine aber an der oberen, deren andere an der unteren Elektrode das Glimmlicht zeigt. Bei einer gleichzeitigen Unterbrechung in der Luft erhält man nur einseitig gerichtete Ströme.

Nach Robinson [1]) zeigen sich die alternirenden Entladungen auch, wenn die Elektroden sehr weit von einander entfernt sind, und können dann durch einen rotirenden Spiegel nachgewiesen werden.

Endlich erscheinen sie bei gewissen Veränderungen des Widerstandes der Schliessung der inducirten Ströme, so z. B. wenn man in den Schliessungskreis eine Geissler'sche Röhre und ausserdem eine Röhre A einschaltet, in welcher zwei Platindrähte vermittelst einer Stopfbüchse in verschiedenen Abständen einander gegenübergestellt werden können [2]). Pumpt man die Luft in dieser Röhre bis zu einer gewissen Verdünnung aus, so entstehen bei einer bestimmten Entfernung der Platindrähte nur einfache, bei einer weiteren Entfernung, wenn statt einfacher Funken büschelartige Funken zwischen denselben erscheinen, alternirende Ströme, durch welche sich beide Elektroden der Geissler'schen Röhre mit blauem Glimmlicht überziehen.

Ist bei constanter Entfernung der Platindrähte die Luft in der evacuirten Röhre A sehr verdünnt, so sind die Ströme einfach; beim Zulassen von Luft werden sie ebenfalls beim Eintreten der büschelartigen Entladung alternirend. — Statt durch Einschalten der Röhre A kann man auch durch Einschalten einer 40000 m langen Inductionsspirale eines grossen Ruhmkorff'schen Apparates oder eines 1 m langen, 3 mm weiten, mit Wasser gefüllten Glasrohres alternirende Ströme erhalten. Wendet man statt des Wassers eine besser leitende Lösung von 0,25 Theilen schwefelsauren Kalis in 100 Thln. Wasser an, so erhält man nur einfache Ströme.

Umgekehrt bemerkt man auch bei zu grosser Verringerung des Widerstandes der Schliessung alternirende Ströme, so z. B. bei Anwendung des grossen Inductionsapparates, in dessen Schliessungskreis die Geissler'sche Röhre und das Rohr A eingeschaltet sind, wenn die Luft in letzterem sehr stark verdünnt ist. Bei grösserem Abstand der Elektroden in A werden die Ströme wieder einfach. — Sind die Platindrähte in der Röhre A oder die Elektroden der mit Wasser gefüllten Röhre so weit von einander entfernt, dass bei Anwendung eines Inductionsapparates mit einer sehr langen Inductionsrolle gerade noch einfache Ströme auftreten, so werden sie bei Anwendung eines kleineren Inductionsapparates alternirend, indem dann auch in der Röhre A die Entladung nicht mehr in einem hellen Funken sondern büschelförmig vor sich geht. — Ebenso erhält man alternirende Ströme, wenn man die Röhre A

---

[1]) Robinson, Phil. Mag. [4] 17, p. 269, 1859*. — [2]) Magnus, Monatsber. der Berl. Akad. 6. Juni 1861*; Pogg. Ann. 114, p. 299, 1862*.

so angeordnet hat, dass bei Anwendung eines kleinen Inductionsapparates die Ströme einfach sind und man denselben nun durch einen grossen Apparat ersetzt. In diesen Fällen erhält man schon bei einmaliger Oeffnung des Stromkreises der inducirenden Rolle, gleichviel ob sie schnell oder langsam erfolgt, alternirende Ströme; so dass sie jedenfalls bei geringen Widerständen nicht allein auf einem Uebergang des Schliessungsstromes mit dem Oeffnungsstrom beruhen, sondern auf die §. 194 u. f. ausgeführten Gründe des Auftretens oscillirender Ströme zurückzuführen sind.

601 Verbindet man nur die eine Elektrode eines Entladungsrohres mit dem einen Ende der Inductionsrolle und umgiebt es mit einem Stanniolblatt, welches mit dem anderen Ende der Rolle oder auch, ebenso wie dieses, mit der Erde verbunden ist, so werden die Schichtungen des elektrischen Lichtes sehr complicirt, indem sich die innere Seite des Rohres und das sie umgebende Stanniolblatt wie Belegungen einer Leydener Flasche verhalten, welche sich abwechselnd durch die Inductionsströme laden und entladen. Dann entstehen in der Röhre alternirende Ströme von der Elektrode zum Glase und umgekehrt. Isolirt man das Stanniolblatt und den nicht mit der einen Elektrode des Geissler'schen Rohres verbundenen Pol der Inductionsrolle, so sind die Erscheinungen wenig deutlich [1]).

Ganz ähnliche Erscheinungen ergeben sich, wenn auf das Rohr zwei Ringe von Stanniol an zwei Stellen aufgeschoben und mit den Polen der Inductionsrolle verbunden werden. Dieselben laden sich hierbei abwechselnd mit entgegengesetzten Elektricitäten. Im Innern des Rohres wird durch Influenz die Elektricität unter jenen Stanniolblättern vertheilt, und zwischen den betreffenden Stellen circuliren abwechselnd gerichtete Ströme, die z. B. durch den Magnet entgegengesetzt abgelenkt werden, Schatten werfen u. s. f. (s. w. u.). Es genügt hierbei, auch nur eine der beiden Stanniolbelegungen mit dem einen Pol des Inductoriums zu verbinden und den anderen Pol desselben und die andere Belegung isolirt zu lassen [2]).

Bringt man in einem kurzen Geissler'schen Rohr nur eine Elektrode an, welche man mit dem einen Ende der Inductionsrolle verbindet, während das andere Ende derselben zur Erde abgeleitet ist, so erscheint, gleichviel mit welchem Ende der Rolle die Elektrode des Rohres verbunden ist, an letzterer blaues Glimmlicht, indem sich das Glas im Innern des Rohres abwechselnd durch den Inductionsstrom ladet und durch die Rolle selbst wieder entladet [3]).

---

[1]) Quet und Seguin, Compt. rend. 47, p. 964, 1858*. — [2]) Plücker, Pogg. Ann. 107, p. 81, 1859*; auch L. Weber, Carl's Repert. 16, p. 240, 1880*; Beibl. 4, p. 487*. — [3]) Magnus, l. c.

602 Alternirende Ströme erhält man auch, wenn an ein weiteres Geissler'sches Rohr, in dessen Enden sich die Elektroden befinden, seitlich oder an dem Ende, hinter der einen Elektrode ein engeres, an seinem anderen Ende zugeschmolzenes Rohr angesetzt ist. Die Wände des engen Rohres laden sich dann mit der einen oder anderen Elektricität und entladen sich wieder rückwärts [1]).

Solche recurrente Ströme treten auch stets ein, wenn die Entladung aus einer weiteren in eine engere Abtheilung einer Geissler'schen Röhre übertritt. Sie verdanken hier jedenfalls ihren Ursprung ebenfalls einer statischen Ladung und darauf folgenden Entladung der Glaswände. Da eine solche bei metallischen Leitern nicht stattfindet, so ist auch eine Bildung alternirender Ströme beim Uebertritt des galvanischen Stromes aus einem dicken in einen dünnen Draht nicht wahrzunehmen.

603 Alternirende Ströme treten ferner auf, wenn ein Entladungsrohr in der Mitte durch eine dünne Scheidewand von Glas getheilt ist, an welcher sich die Elektricitäten binden können. Auf den Magnet in äquatorialer Lage aufgelegt, zeigt ein solches Rohr in beiden Hälften einen doppelten Lichtstreifen; indem der Lichtstrom z. B. von der positiven Elektrode *A*, Fig. 199, sich nach unten senkt, bis zur Glasscheidewand fort geht, dort nach oben sich wendet und auf der oberen Seite des Rohres zur Elektrode zurückkehrt. Der Strom von der negativen Elektrode *B* nimmt den umgekehrten Weg, so dass es scheint, als ob zwei positive Ströme, der eine von der positiven Elektrode ausgehende an der unteren,

Fig. 199.

A B

der andere von der negativen Elektrode ausgehende an der oberen Seite des Rohres zwischen beiden Elektroden circulirten. Dabei findet sich in jeder der beiden Hälften der Glasröhre eine dunkle Stelle in dem Lichtstrome, welche da liegt, wo der positive Strom über die Glasscheidewand auf die andere Seite der Röhre getreten ist. — Wird die Röhre axial über die Magnetpole gelegt, so zeigen sich die entsprechenden Erscheinungen in der Horizontalebene; die dunklen Stellen liegen aber an derselben Seite des Rohres (s. w. u.) [2]).

Schliesst man das Fig. 200 gezeichnete Rohr bei *D* und setzt daselbst eine Elektrode von Platin ein, so erscheint an beiden Elektroden das negative Glimmlicht, gleichviel, in welcher Richtung die Verbindung der Elektroden mit dem Inductorium erfolgt.

---

[1]) Plücker, Pogg. Ann. **116**, p. 27, 1862*. — [2]) Wendet man statt des Inductionsstromes den Strom einer Influenzmaschine an, so durchdringt er bei sehr dünnen Scheidewänden das Glas; das negative Licht erscheint nur an der

Bei Abtheilung der Röhre in drei Theile entstehen noch complicirtere Erscheinungen. Geissler formt solche sogenannte Inductionsröhren in der Art, dass die die Elektroden enthaltenden kleinen Kugeln AA_1, Fig. 200 (in der nur das eine Ende des Apparates gezeichnet ist), durch

Fig. 200.

engere Röhren mit grösseren Kugeln BB_1 verbunden sind, um die noch grössere Kugeln herumgeblasen sind, welche sich durch engere Röhren mit einem grösseren elliptischen Glasgefäss D vereinen und so mit diesem die mittlere Abtheilung des ganzen Rohres darstellen.

Die in den mittleren Theilen dieser Geissler'schen Inductionsröhren sich bildenden alternirenden Ströme sind besonders geeignet zur Untersuchung der Gasspectra, da in ihnen kein Absatz von Metallspiegeln durch Zerstäubung der Masse der negativen Elektrode eintritt. Man verengt den mittleren Theil der Röhren zu einem Capillarrohr.

Zu diesem Zweck kann man auch die auf gleichem Princip beruhenden Röhren von Salet[1]) verwenden, welche aus zwei durch ein Capillarrohr verbundenen weiteren cylindrischen Räumen bestehen, um welche letztere Stanniolbelegungen gelegt sind.

604 Endlich erhält man auch noch alternirende Ströme in den Entladungsröhren, wenn man jede ihrer Elektroden mit den beiden entgegengesetzten Polen zweier Ruhmkorff'scher Inductorien verbindet.

Es würde indess durchaus ungerechtfertigt erscheinen, aus diesen und ähnlichen Versuchen zu schliessen, dass zwei entgegengesetzt gerichtete Ströme, ohne zu interferiren, gleichzeitig das Rohr durchströmen können[2]). — Wenn man auch bei einer ähnlichen Anordnung leuchtende Entladungen wahrnimmt und in einem in den Stromkreis eingeschalteten Voltameter Wasserzersetzung beobachtet, während doch die Inductionsströme beider Apparate sich aufheben sollten, so ist der Grund hiervon nur darin zu suchen, dass die entgegengesetzten Ströme beider Apparate

einen Elektrode und auf einem in den Schliessungskreis eingeschalteten Jodkaliumpapier wird das Jod einseitig abgeschieden (Poggendorff, Pogg. Ann. 134, p. 304, 1868*; Berl. Monatsber. 23. April 1868*).

[1]) Salet, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 28, p. 1, 1873*. — [2]) Masson, Compt. rend. 36, p. 255, 1853*.

nicht ganz gleichzeitig den Schliessungskreis durchfliessen, sondern abwechseln. Denn selbst wenn die inducirenden Spiralen beider Apparate hinter einander entgegengesetzt verbunden werden, und die Unterbrechungen des durch sie hindurchgeleiteten Stromes durch einen einzigen Interruptor geschehen, so kann immer noch die Zeit zum Entstehen und Vergehen des Magnetismus in den Eisenkernen beider Apparate verschieden sein [1]). Schiebt man aber auf ein einziges, längeres Eisendrahtbündel zwei gleiche Inductionsspiralen, welche man entgegengesetzt verbindet, so erhält man beim Magnetisiren des Drahtbündels kaum physiologische Wirkungen und auch keine Funken und Gasentladungen zwischen den nicht verbundenen Enden der Spiralen, namentlich wenn man die Spiralen so angeordnet hat, dass bei ihrer entgegengesetzten Verbindung die freien Enden von beiden ihre äusseren Drahtenden sind.

605 Wir haben bisher angenommen, dass die Elektricität den Elektroden der Entladungsapparate aus einer von der Entladung selbst bis zu einem gewissen Grade unabhängigen Elektricitätsquelle zugeführt wird, welche sie, wie eine kleinere Influenzmaschine, langsam liefert und auch keine grösseren geladenen Flächen mit den Elektroden verbunden sind, resp. mit den Elektroden durch schlecht leitende Körper in Verbindung stehen, so dass, wenn an den Elektroden das zu einer Entladung erforderliche Potential erreicht ist und die daselbst aufgehäuften Elektricitäten sich ausgeglichen haben, ihnen keine weitere Mengen folgen, sondern nach der instantanen Entladung erst wieder eine längere Zeit vergeht, bis von Neuem in den Elektroden das frühere Entladungspotential gebildet ist. Dann ist also die Ladung fast normal.

606 In ähnlicher Weise instantan und von längeren Zwischenräumen unterbrochen sind die Entladungen, wenn etwa durch die Elektricitätsquelle ein Condensator geladen wird, dessen Belegungen mit den Elektroden des Entladungsapparates unter Einschaltung einer Funkenstrecke verbunden sind. Wird der Apparat so eingerichtet, dass dem ersten Uebergange des Funkens durch diese Strecke keine weiteren oscillatorischen oder Partialentladungen folgen, so durchfliessen ihn auch jetzt einzelne momentane Entladungen, welche indess grössere Elektricitätsmengen fortführen, als zur Bildung des Entladungspotentials erforderlich sind; die Schichtung wird schwächer oder verschwindet.

In den beiden betrachteten Fällen ist die Ablenkung eines in den Schliessungskreis eingeschalteten Galvanometers unabhängig von den Verhältnissen in der Röhre und nur durch die gesammte Elektricitätsmenge bestimmt, welche in der Zeiteinheit den Multiplicator durchfliesst, vorausgesetzt nur, dass die Einzelentladungen so schnell auf einander folgen,

---

[1]) Gaugain, Compt. rend. 40, p. 358, 1855*; vergleiche auch Poggendorff, Pogg. Ann. 95, p. 166, 1855*.

dass die Zwischenzeit zwischen ihnen gegen die Schwingungsdauer der Nadel klein ist.

607 Anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn noch vor der Rückkehr des Gases in der Entladungsröhre in den früheren Zustand von der Quelle oder den mit ihr verbundenen Behältern den Elektroden weitere Elektricitätsmengen zuströmen [1]). Dies ist schon bei Anwendung einer grösseren, vielscheibigen Influenzmaschine der Fall; ebenso, wenn die Conductoren einer kleinen Maschine dieser Art mit den beiden Belegungen eines Condensators und letztere unter Einschaltung eines feuchten Fadens mit den Elektroden des Entladungsapparates verbunden sind. Dann sind zwei Fälle möglich. Einmal bleibt daselbst eine Zeit lang das Potential so gross, dass die Elektricität die durch die erste Entladung veränderte Gasschicht in einem continuirlichen Strom während einer gewissen Zeit durchfliesst, bis die Spannung zu klein geworden ist, um das Gas zu durchbrechen.

Dann bleibt nach längerer Dauer der immer schwächer werdenden Entladung im Condensator ein bedeutender Rückstand. Im rotirenden Spiegel erscheint die Entladung nicht instantan, sondern sie ist mit abnehmender Helligkeit verbreitert.

Dabei hängt u. A. auch die Erwärmung des Gases und der Elektroden in der Röhre nicht allein mehr von der entladenen Elektricitätsmenge, sondern von der Schnelligkeit ihres Abfalls resp. des Zuströmens durch die schlechten Leiter zu den Elektroden ab (s. w. u.).

608 In einem anderen Falle können die Elektricitäten den Elektroden etwas langsamer zufliessen; erst nachdem das durch die erste Entladung veränderte Gas bereits partiell seinen früheren Zustand angenommen hat, häufen sich daselbst die allmählich zuströmenden Elektricitätsmengen zu dem für eine neue Entladung in dem immer noch modificirten Gase erforderlichen kleineren Potential an u. s. f. In diesem Falle folgt eine Reihe von einzelnen, schwächer werdenden Entladungen auf einander.

Letzteres ist auch möglich, wenn die Zuleitung vom Condensator zum Entladungsapparat durch eine kleine Funkenstrecke in der Luft unterbrochen wird.

In dem ersten Fall erscheint, wie erwähnt, jede Entladung im rotirenden Spiegel verbreitert, mit abnehmender Helligkeit; im zweiten erscheint sie aus einer Reihe von Partialentladungen zusammengesetzt.

In ähnlicher Weise beobachteten z. B. Spottiswoode und Moulton, als sie durch eine Entladungsröhre den Strom einer Influenzmaschine leiteten und der negativen Elektrode einen starken Magnetpol näherten, dass auf der Wand eine ganze Reihe grüner Flecke entstanden, welche

---

[1]) Siehe über diese Verhältnisse Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 239, 1880*.

den immer schwächer werdenden und immer weniger vom Magnet abgelenkten Partialentladungen entsprachen [1]).

609 Aehnliche, indess noch complicirtere Verhältnisse ergeben sich bei Anwendung eines Inductoriums [2]). Auch hier sammeln sich die freien Elektricitäten nicht nur an den Enden der Inductionsrolle an, sondern auch in ihrem Innern. Ist an den Elektroden das zur Entladung erforderliche Potential erreicht, so folgen wie oben der ersten Entladung noch weitere Elektricitätsmengen durch den Entladungapparat, bis das Potential bis zu einem bestimmten Werthe gesunken ist; zugleich aber vereinen sich rückwärts durch die Inductionsrolle die getrennten Elektricitäten. Je nach den Verhältnissen der Entladungsapparate, der Form und dem Widerstande des Inductoriums, dem Widerstande und der Capacität der zwischen dasselbe und die Elektroden eingefügten Leiter kann daher das Verhältniss der durch den Entladungsapparat hindurchgegangenen zu der rückwärts entladenen Elektricitätsmenge sehr verschieden sein. Die Entladung kann continuirlich eine Zeit lang dauern, oder aus Partialentladungen zusammengesetzt sein; auch oscillirende Entladungen können auftreten.

Nur wo man die qualitativen Verhältnisse der Entladung im Allgemeinen erforschen will, oder wo die Resultate von obigen Bedingungen unabhängig sind, darf man sich des Inductoriums bedienen. In allen anderen Fällen gestatten die Beobachtungen mit demselben keine sicheren Schlüsse.

610 So ist es z. B., wenn man in den Schliessungskreis des Inductoriums oder eine Zweigleitung zu demselben ein Galvanometer einschaltet und entweder direct aus der Stromintensität den „Widerstand" des Entladungsapparates zu bestimmen sucht, oder indem man ihn durch einen flüssigen oder festen Rheostatenwiderstand ersetzt, bis die Stromintensität die frühere geworden ist. Bei Einfügung des Entladungsapparates treten nach dem Obigen ganz andere Verhältnisse ein, als bei der eines gewöhnlichen Widerstandes; beide Vorgänge sind nicht mit einander zu vergleichen und daraus ist nicht abzuleiten, ob die Gase einen besonderen Widerstand darbieten.

611 Derartige Versuche sind mehrfach angestellt worden.

So verbindet Morren [3]) eine horizontale Entladungsröhre von 29 mm innerem Durchmesser und 45 cm Länge, in welche meist Aluminiumelektroden, nur bei Anwendung von Sauerstoff Platinelektroden eingesetzt sind, deren Enden 24 cm von einander entfernt sind, mit

---

[1]) Spottiswoode und Moulton, Proc. Roy. Soc. **32**, p. 388, 1881*; Beibl. **7**, p. 727*. — [2]) Eilh. Wiedemann, l. c., G. Wiedemann, Pogg. Ann. **158**, p. 277, 1876*. — [3]) Morren, Ann. de Chim. et de Phys. [4] **4**, p. 325, 1865*; Pogg. Ann. **130**, p. 612*.

dem evacuirten Recipienten einer Quecksilberluftpumpe und lässt langsam das Gas aus dem Rohre in den letzteren übertreten. Ein mit dem Entladungsrohre verbundenes Quecksilbermanometer und ein mit concentrirter Schwefelsäure gefülltes Manometer gestatten, den Druck des Gases zu bestimmen. — Der Inductionsstrom eines kleinen, mit etwa 4 Bunsen'schen Elementen verbundenen Ruhmkorff'schen Inductoriums wird zunächst durch ein Galvanometer mit astatischem Nadelsystem und eine oder mehrere mit Wasserstoff gefüllte Geissler'sche Röhren geleitet, sowohl, um den Strom beliebig zu schwächen (bis der Ausschlag der Nadeln unter 60° ist), als auch, um ihm eine einseitige Richtung zu ertheilen. Sodann wird in den Schliessungskreis noch die mit dem zu untersuchenden Gase gefüllte Röhre eingeschaltet und wiederum der Ausschlag gemessen. Aus den Ausschlägen werden die ablenkenden Kräfte berechnet. Die Geissler'schen Röhren sind aussen sorgfältig zu trocknen, da sonst die auf ihnen condensirte Feuchtigkeit leitet.

Hierbei ergiebt sich, dass bei abnehmendem Druck zuerst beim Wasserstoff (bei dem Drucke von 74 mm), dann bei Kohlensäure (39 mm), Luft (29 mm), Sauerstoff und Stickstoff (23 mm) der Strom durch die Röhren in der einfachen Gasentladung geht. Kohlenoxyd lässt den Strom erst bei einem Drucke von 11 mm, Grubengas bei 16 mm, schweflichte Säure und Cyangas bei 5 mm hindurch. Letzteres Gas zersetzt sich leicht, so dass die Ablenkungen der Galvanometernadel bald unregelmässig werden und die Farbe des Lichtes schnell wechselt. Die Ablenkungen bleiben unter den bei den einfachen Gasen erhaltenen. Bei weiterer Verdünnung wächst die Stromintensität erst langsam, dann sehr schnell bis zu einem Drucke von 2 mm bei Wasserstoff, 1 mm bei Stickstoff, 0,7 bis 0,8 mm bei Sauerstoff, Kohlensäure und Luft, und nimmt bei weiteren Verdünnungen wieder etwas langsamer ab.

Analog hat de la Rive[1]) die Ströme eines Inductoriums durch ein Geissler'sches Rohr geführt, durch welches nur die Oeffnungsströme hindurchgingen. Zur Messung ihrer mittleren Intensität werden sie mittelst Platinplatten durch einen mit destillirtem Wasser gefüllten Trog von 20 cm Länge, 5 cm Breite und 3 cm Tiefe geleitet, und in denselben Platindrähte gesenkt, welche bis auf 1 mm ihres Endes mit Glasröhren bedeckt sind und vermittelst einer Mikrometerschraube einander genähert werden können. Durch diese Drähte wird ein Theil des Stromes zum Galvanometer abgezweigt. Die Platindrähte werden durch die Mikrometerschraube so lange verstellt, bis der Ausschlag der Galvanometernadel unter den verschiedenen Versuchsanordnungen der gleiche wird. Die Entfernung der Drähte giebt ein Maass für die Intensität des Stromes im Schliessungskreise. So fand de la Rive, dass bei dem Drucke, **612**

[1]) De la Rive, Compt. rend. 56, p. 669, 1863*; Archives des Sciences phys. et nat. Nouv. Sér. 17, p. 53*.

welcher dem Maximum der Leitungsfähigkeit der Gase entspricht, der Widerstand der Geissler'schen Röhren ihrer Länge direct proportional ist und mit dem Querschnitt und Volumen der Röhren abnimmt.

613 Die §. 609 und 610 angestellten Betrachtungen sind auch bei den Versuchen zu berücksichtigen, durch welche man den Widerstand der einzelnen Theile der Entladung zu bestimmen gesucht hat.

Hittorf[1]) verzweigt so den Strom des Inductoriums durch zwei gleiche und gleichzeitig evacuirte, neben einander liegende cylindrische Röhren, welche zwei gleich dicke ($^2/_3$ mm), aber verschieden (26,5 mm und 103 mm) lange Platindrähte als negative Elektroden enthalten. Dann erscheint bei schwachen Verdünnungen nur in dem einen Rohr mit der längeren Kathode Glimmlicht. Ist aber die Verdünnung so weit gestiegen, dass das Glimmlicht beide Elektroden ganz bedecken kann, so theilt sich der Strom zwischen beiden Röhren. Misst man die Stromintensität durch ein in eine Zweigleitung eingefügtes Galvanometer, so ergiebt sich, wie dort, sowohl bei Anwendung verschiedener Gase, wie bei verschiedenen Verdünnungen, dass das Verhältniss der Stromintensitäten (1 : 4,17 bis 4,33) nahezu dasselbe ist, wie das der Längen der Drähte (1 : 3,87). — Bei sehr grossem Unterschiede der Oberflächen der Elektroden (1 : 100) wird indess das Verhältniss der Stromintensitäten bedeutender gegen das Verhältniss der Längen.

Der erste Theil dieses Satzes folgt unmittelbar, wenn die Entladung von allen Stellen der verschieden langen Elektroden gleichzeitig ausgeht, also bei gleicher Dichtigkeit an allen Stellen beginnt; dann muss die entladene Elektricitätsmenge der Oberfläche der Elektroden proportional sein.

Unter Annahme eines Widerstandes wurde dieses Resultat in der Weise formulirt, dass der Widerstand der Entladungsröhren der Oberfläche der negativen Elektrode nahezu umgekehrt proportional ist.

Dass sich dasselbe Verhältniss nicht bei Einschaltung der einzelnen Röhren in den Schliessungskreis des Inductoriums und Ersetzung derselben durch verschieden lange Röhren voll Zinkvitriol ergeben kann, folgt aus den Darlegungen in §. 609 und 610.

Den Grund der Abweichungen von der Proportionalität sucht Hittorf einmal in der bedeutenderen Abkühlung der kleineren Elektroden durch die Umgebung. Wenn man z. B. die Oberflächen der Elektroden in den parallel gestellten Röhren dadurch verkleinert, dass man sie bis auf einen breiteren oder sehr schmalen Ring mit Glas bedeckt und so die Elektrode des ersteren Rohres sehr stark abkühlt, so vermehrt diese Abkühlung den Widerstand so sehr, dass bei einem Verhältniss der Oberflächen von 40,4 : 1 durch das Rohr mit kleinerer Fläche kein Strom mehr fliesst.

---

[1]) Hittorf, Pogg. Ann. **136**, p. 1 u. 197, 1869*.

Sodann können nach Hittorf die Abweichungen von dem kleinen, aber doch nicht ganz verschwindenden Widerstande der positiven Entladung herrühren, der mit wachsender Stromintensität I in einem grösseren Verhältniss abnehmen sollte, als dem Werthe I entspricht, da die Erwärmung der Gase unter Annahme des Joule'schen Gesetzes I^2 proportional wäre (siehe indess weiter unten).

614 Sind die Räume, welche bei verschiedenen negativen Elektroden das Glimmlicht erfüllt, nicht einander ähnlich, wie bei Anwendung gleich dicker und nur verschieden langer Elektroden, so ändert sich nach Hittorf das Verhältniss der Widerstände je nach der Gestalt der Elektroden und des vom Glimmlicht erfüllten Raumes. So verhielten sich die Widerstände zweier 10 cm weiter Glascylinder, die mit gleichen positiven Drähten versehen waren und in gleichen Abständen denselben gegenüber zwei gleich lange Cylinder von Aluminium von 1,625 und 10,375 mm Durchmesser enthielten, deren Endflächen und Zuleitungsdrähte mit Glas bedeckt waren, wie 3 : 1; während das Verhältniss der Oberflächen der Elektroden 1 : 6,385 betrug.

Der Widerstand beim Uebergang der Elektricität an der negativen Elektrode kann also nach Hittorf nicht nur an ihrer Oberfläche seinen Sitz haben, sondern muss mit dem Ausbreitungsgebiet des Glimmlichtes zusammenhängen.

Auch hier kann die Entladung an der einen Elektrode später endigen, als an der anderen, wodurch die Unterschiede bedingt sein können. Dass nicht nur durch den einen der neben einander geschalteten Glascylinder, in welchem die zur Einleitung der Entladung erforderliche Dichtigkeit kleiner ist, die Gesammtentladung hindurchgeht, folgt daraus, dass das Inductorium Elektricität von grösserer Dichtigkeit liefert, als zur Entladung auch durch den anderen Glascylinder erforderlich ist.

615 Mit grösserer Verdünnung der Luft nimmt der Widerstand des Glimmlichtes zu. Wurden z. B. in zwei mit Wasserstoff gefüllten ellipsoidischen Gefässen von etwa 20 cm Länge und 10 cm mittlerer Weite in der Richtung der Längsaxe liegende Aluminiumdrähte als Elektroden verwendet, von denen die positiven 20 mm, die negativen 72 mm weit aus ihren Capillarröhren hervorragten, und der Strom durch beide neben einander verzweigt, so ergab sich z. B. das Verhältniss der Stromintensitäten bei Drucken, welche sich wie 1 : 2 verhielten, und bei Vertauschung der Gefässe resp. wie 1 : 2,59 und 2,52. Hittorf schliesst hieraus, wenn sich bei hinlänglichem Raum das Glimmlicht auf einer längeren Elektrode mit steigender Verdünnung immer weiter ausbreitet, dass event. die hierdurch eintretende Verminderung des Widerstandes die Zunahme desselben durch die Verdünnung des Gases zum Theil aufwiegt und die Intensität des Stromes constant bleibt, wenn die Aenderung des Wider-

standes des positiven Lichtes die Compensation ausserdem noch vervollständigt.

Wiederum endet in dem verdünnten Gase, je nachdem der kritische Punkt überschritten ist oder nicht, die Entladung früher oder später, so dass die entladenen Elektricitätsmengen verschieden sind.

Auch von dem Stoff der Kathode ist der Widerstand des Glimmlichtes abhängig. So verhalten sich die Widerstände bei Aluminium-, Platin-, Silber- und Zinkelektroden etwa umgekehrt wie 2:8:8:5; so dass also dieselben bei den Metallen, Platin, Silber, welche am leichtesten zerstäuben und Absätze auf dem Glase erzeugen, am kleinsten sind. Bei Eisen ist der Widerstand etwas grösser.

616 Beim positiven Licht nimmt nach Hittorf der Widerstand mit wachsender Stromintensität ab. Der Inductionsstrom wurde z. B. durch ein elliptisches Gefäss *A*, Fig. 201, geleitet, an welches zwei 13 mm weite

Fig. 201.

Glasröhren von verschiedener Länge *db* und *ec* angeblasen waren, die zwei gleiche positive Elektroden von Aluminium *b* und *c* enthielten, während in dem weiten Gefässe selbst sich eine 73 mm lange negative Elektrode *n* von Platindraht befand. Der Strom wurde erst durch *c* und *n* geleitet, dann durch *b* und *n* und die Intensität durch Einschaltung eines Capillarrohres voll Zinkvitriollösung auf denselben Werth gebracht. Dann verhielten sich die Widerstände der positiven Entladung auf der Länge *ec* — *db* (115 cm); bei den Stromstärken 1, 2,3 und 4,9 wie 61:34:23.

Nach §. 609 würden diese Resultate besagen, dass mit wachsender Stromstärke, d. h. vermehrter Elektricitätszufuhr die durch die positive Elektrode entladenen Mengen relativ schneller steigen, wohl wegen der stärkeren Veränderung des Gases bei der ersten Entladung und relativ längeren Dauer derselben.

617 Aehnliche Versuche ergeben, dass der Widerstand des positiven Lichtes, welcher bei grossen Dichtigkeiten gegen den des negativen Lichtes bedeutend ist, entgegen dem Verhalten des letzteren, mit wachsender Verdünnung bis zu einem Drucke von $^1/_{320}$ mm beständig abnimmt. Dieses entgegengesetzte Verhalten könnte bedingen, dass bei einer bestimmten Verdünnung ein Maximum der Leitungsfähigkeit der ganzen Entladung

eintritt; welches jedoch sowohl von der Grösse der Kathode, als auch von der Gestalt des Rohres abhängt.

618 Bei grossen Verdünnungen kann entsprechend der Widerstand der positiven Entladung gegen den des Glimmlichtes zurücktreten. Verwendet man z. B. zwei mit Wasserstoff gefüllte Röhren, z. B. von 46 mm Durchmesser, mit gleichen Platin-Kathoden, denen die gleich gestalteten positiven Elektroden im Abstande von 12 und 146 mm gegenüberstehen, und verzweigt durch sie den Strom, so geht er bei geringeren Verdünnungen nur durch das Rohr mit näherstehenden Elektroden; bei grösseren Verdünnungen aber meist durch beide Röhren. Die Intensitäten der Ströme verhalten sich in ihnen dann wie:

Spannkraft	1,85	1	0,55	0,25	0,1 mm
Verhältniss der Intensitäten	1,65	1,215	1,034	1,049	1,039

so dass bei grösseren Verdünnungen der Widerstand von der Länge der Röhren, d. h. von der Länge der positiven Entladung nahezu unabhängig ist. Namentlich bei kürzeren Abständen der Elektroden und bei grossen Verdünnungen verschwindet daher der Widerstand der positiven Entladung gegen den des Glimmlichtes. Dieses entgegengesetzte Verhalten des positiven und negativen Lichtes zeigt sich auch, wenn man die Entladung durch eine Röhre, Fig. 202, von *a* nach *d* leitet, deren Weite

Fig. 202.

60 mm beträgt, und in der sich in der Mitte noch zwei Elektroden *b* und *c* befinden. Bei grösseren Drucken ist *b* von Glimmlicht umhüllt und der Strom geht von *a* nach *b*, durch Draht *bec* und von *c*, welches auf der *d* zugekehrten Seite rothes positives Licht zeigt, nach *d*. Bei bedeutender Verdünnung erscheint aber zwischen *b* und *c* positives geschichtetes Licht, welches zuerst von dem Glimmlicht um *b* durch einen dunklen Raum getrennt ist, bei grösserer Verdünnung dasselbe aber ganz umhüllt. Die Bestimmung der Stromstärken in dem Hauptkreise und dem Drahte *bec* durch ein Galvanometer gestattet, die Intensitäten der Ströme zwischen *b* und *c* in der positiven Entladung und in dem Zweige *bec* zu bestimmen, wo die Entladung durch das *b* bedeckende Glimmlicht hindurchgeht.

Die Intensitäten (die im Drahte *bec* = 1 gesetzt) waren:

Druck	1,5	1,1	0,75	0,5	0,15	0,075 mm
In der Luftstrecke	0,467	0,35	3,13	17,23	131	187,5

so dass die Widerstände für das positive Licht im Verhältniss zum Widerstande des negativen Lichtes sehr schnell abnehmen.

Dieses Resultat würde zeigen, dass die Potentiale zur Entladung an der positiven Elektrode mit abnehmendem Druck schneller abnehmen, als die an der negativen.

Wie wir wiederholt erwähnt haben, können die vorstehenden Versuche über die Widerstände der einzelnen Theile der Entladung nicht ohne Weiteres Aufschluss geben, sondern beziehen sich vielfach auf die zur Entladung erforderlichen Potentiale. Weitere Begründungen hierfür geben die später zu erwähnenden Versuche über das thermische Verhalten der Entladungen.

619 Bringt man in eine Röhre, an deren Enden zwei kleine Platten *a*, *d* als Elektroden dienen, zwischen denselben zwei etwas grössere, mit ihren Ebenen gegen die Axe der Röhre senkrechte Metallplatten, von denen Drähte durch die Glaswand hindurchgehen, leitet die eine *b* ab und verbindet die andere *c* mit einem Elektroskop, so ladet sich dasselbe bei schwachen Verdünnungen des Gases in der Röhre nicht, bei bedeutenden Verdünnungen ist die Ladung positiv, wenn die der Platte *c* zunächst liegende Elektrode die positive ist. Im entgegengesetzten Falle ist die Ladung unbestimmt. Sind die Drähte an *b* und *c* mit neben einander hängenden Drähten verbunden, so stossen sich dieselben ab[1]).

Man kann daraus entnehmen, dass auch im Inneren der positiven Lichtsäule die freie Spannung von der positiven zur negativen Elektrode abnimmt und positiv ist.

620 In dem dunklen Raume ist der Potentialabfall in den Entladungsröhren ein anderer, als in dem leuchtenden Theile der Entladung. So bringt de la Rive[2]) in eine weite Entladungsröhre zwei im Abstande von 3 cm einander parallel gegenüber an Platindrähten befestigte Platinplatten von 7 mm Durchmesser. Die Platindrähte sind bis zu den Platten mit Glasröhren umgeben und mit einem Galvanometer verbunden. Wird durch das Rohr der Entladungsstrom des Inductoriums geleitet, so zeigt der durch die Platinplatten derivirte Strom eine starke Intensität, wenn sich die Platten in der leuchtenden Entladung befinden, eine schwache im dunklen Raume. Diese verschiedene Stellung kann man leicht durch Umkehrung der Stromesrichtung erzielen.

So ist z. B. der Ausschlag des Galvanometers, wenn die Entladung in Wasserstoff oder in Luft geschieht:

1) Crookes, l. c. — 2) De la Rive, Compt. rend. **56**, p. 669, 1863*; Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. **17**, p. 53*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **8**, p. 455, 1866*; Pogg. Ann. **131**, p. 577*.

Druck	Wasserstoff		Luft	
	Platinplatten dicht an der			
	+ Elektr.	— Elektr.	+ Elektr.	— Elektr.
15 mm	90	90	—	—
6	82	65	70	18
4	52	2	40	8
2	35	0	18	3

Der Unterschied zeigt sich also namentlich bei schwächerem Druck, wo auch erst die Schichtung und der dunkle Raum deutlich auftreten.

621 Führt man den Elektroden der Entladungsröhren die Elektricitäten von den Polen einer galvanischen Säule von so grosser elektromotorischer Kraft zu, dass dieselbe dem zur Entladung erforderlichen Potentiale gleich kommt, so tritt eine solche ein. Hierbei sind zwei Fälle möglich. Entweder führt die Säule die Elektricitäten in nur geringerer Menge den Elektroden zu, wenn also ihr Widerstand und der der Zuleitung zu den Elektroden gross ist; dann hört die beginnende Entladung, ähnlich wie bei der Entladung eines Condensators, bald auf. Eine neue Entladung tritt erst bei erneuter Herstellung des früheren Potentials ein, die Entladungen sind discontinuirlich. Oder die Elektricitätszufuhr ist bei besserer Leitungsfähigkeit der Schliessung ausserhalb des Entladungsrohres so bedeutend, dass nach der eingeleiteten ersten Entladung das zur Fortsetzung derselben erforderliche Potentialniveau bestehen bleibt. Letzteres kann kleiner sein, als bei Beginn der Entladung, da das Gas, resp. die Elektroden durch dieselbe erwärmt oder verändert sind. Dann ist die Entladung continuirlich, im rotirenden Spiegel löst sie sich nicht in einzelne Bilder auf.

Insofern hierbei eine bestimmte Potentialdifferenz an den Elektroden zum fortgesetzten Durchgang der Elektricität erhalten werden muss und eine ihrem Product mit der durch das Rohr hindurchgegangenen Elektricitätsmenge (der Intensität) proportionale Arbeit in dem Entladungsapparat in der Zeiteinheit dauernd geleistet wird, kann man jene Arbeit mit einem „Leitungswiderstand" des Entladungsapparates in Beziehung bringen. Man könnte diese in einem Entladungsrohre geleistete Arbeit z. B. bei Entladung eines Condensators messen, indem man in den Schliessungskreis ein Luftthermometer einschaltete und die Erwärmung desselben bei Entladung der gleichen Elektricitätsmenge mit und ohne Einschaltung der Entladungsröhre untersuchte. Die Differenz der in derselben erzeugten Wärmemengen entspricht der Arbeit in dem Rohre[1]).

[1]) Vergl. Zomakio, J. d. Phys. **16**, p. 416, 1881*; Journ. de la Soc. phys.-chim. Russe 1881, p. 48*; Beibl. **6**, p. 41*.

Indess ist wohl zu beachten, dass dieselbe ganz anderen Gesetzen unterliegt, als der Widerstand fester und flüssiger Körper.

622 Ist bei relativ langsamer Elektricitätszufuhr die Entladung discontinuirlich, so gelten die von mir und Rühlmann gefundenen Gesetze.

Bei Versuchen mit einer grossen Chlorsilberbatterie, deren Pole zugleich mit einem Thomson'schen Elektrometer mit den Elektroden einer Entladungsröhre verbunden waren, blieb dementsprechend trotz der Aenderung der Intensität des Stromes durch Einschaltung von Widerständen die Potentialdifferenz an den Elektroden unverändert. Ferner nahm das Potential mit der Verdünnung erst ab (bis zu einem Drucke von 0,642 mm) und dann wieder zu, bis endlich bei einem sehr vollkommenen Vacuum, welches durch Absorption der die Röhre erfüllenden Kohlensäure durch erhitztes Kali hergestellt wurde, selbst bei Anwendung von 11000 Elementen kein Strom mehr hindurchging[1]).

Werden in das Innere des Rohres kleine durch die Glaswand hindurchgehende, innerhalb Spitzen oder Ringe tragende Metallsonden geführt und mit dem Elektrometer verbunden, so ist in einem cylindrischen Rohre die Potentialdifferenz äquidistanter Punkte am grössten nahe der negativen, kleiner nahe der positiven, am kleinsten zwischen beiden Elektroden. Im letzteren Fall ist die Potentialdifferenz nahe proportional dem Abstand der Sonden[1]).

623 Bei Säulen mit geringem Widerstand, 800 Bunsen'schen Elementen von je 5 Q.-E. Widerstand fand Hittorf[2]) unter Einschaltung von Säulen von Jodcadmiumlösung (1 Thl. Jodcadmium in 10 Thln. Amylalkohol) die Entladung discontinuirlich[3]), so lange der Gesammtwiderstand der Leitung grösser als $3,5 \cdot 10^6$ Q.-E. war; und zwar wurden mit abnehmendem Widerstand die Abstände der einzelnen Entladungsbilder im rotirenden Spiegel immer kleiner. War der Widerstand kleiner, als jener Grenzwerth, so erschien die Entladung continuirlich. Indess hat Eilhard Wiedemann[4]) berechnet, dass auch hierbei noch weiter

---

1) Warren de la Rue u. Hugo Müller, Phil. Trans. **169**, pt. 2, p. 155, 1878*; Beibl. **2**, p. 358*; Phil. Trans. **171**, pt. 1, p. 65, 1879*; Beibl. **4**, p. 485*. Weitere Versuche über die Erscheinungen der Entladungen der Chlorsilberbatterie bei Einfügung von Accumulatoren (zweier parallelen, von einander isolirten, spiralig gewundenen Kupferdrähten) siehe Warren de la Rue, Hugo Müller und Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. **23**, p. 356, 1875*. — 2) Hittorf, Wied. Ann. **7**, p. 553, 1879*. — 3) Diese Discontinuität ist zuerst von Gassiot (Rep. Brit. Assoc. 1865 [2], p. 15*) beobachtet worden. — 4) Eilhard Wiedemann (Wied. Ann. **10**, p. 241, 1880*) nimmt an, in einem unendlichen, aus zwei parallelen Wänden bestehenden Rohr werde das Gas überall auf gleiche Temperatur erhitzt und gebe an die Wände, deren Temperatur Null sei, Wärme ab, dann folgt nach den Gesetzen des Wärmeflusses, dass die Temperaturerhöhung in der Mitte eines Rohres von 1 cm Weite nach $1/_{100}$ Secunde auf $1/_{11}$, nach $1/_{1000}$ Secunde auf $1/_{1,3}$ gefallen ist, in einem Rohr von 1 mm Durchmesser dies schon nach $1/_{10000}$ und $1/_{100000}$ Secunde eingetreten ist. Hat das Gas durch eine Entladung die Temperatur 1000^0, so ist nach

discontinuirliche Entladungen erfolgen können, und nur die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels nicht genügt, um sie von einander zu sondern.

Da somit die Versuche mit dem rotirenden Spiegel nicht ganz entscheidend sind, versuchten Warren de la Rue und H. Müller (l. c.) auf anderem Wege die Discontinuität nachzuweisen. Sie leiteten die durch eine Entladungsröhre geführten Ströme ihrer starken Batterie durch die primäre Spirale eines Inductoriums und beobachteten Ablenkungen an einem in den Kreis der secundären Spirale eingeschalteten Galvanometer. 624

Letzterer Versuch ist von Hertz[1]) wiederholt worden, da, wenn nicht die doppelsinnige Ablenkung der Nadel die Erscheinung bedingt, sie nicht wohl erklärlich ist.

Durch ein 340 mm langes, 20 mm weites Rohr wurde die Entladung einer Planté'schen Ladungsbatterie (Reagenzgläser von 125 mm Höhe, 14 bis 15 mm Durchmesser mit 10 mm breiten Bleiblechstreifen und verdünnter Schwefelsäure) zwischen einer Stahlplatte von 18 mm Durchmesser als Kathode und einem Stahldraht als Anode in verdünnter Luft geführt, so dass das Glimmlicht 50 bis 60 mm lang war, das positive Licht 6 bis 9 rothe Schichten zeigte. Durch Flüssigkeitswiderstände wurde die Stromintensität auf $^1/_{100}$ bis $^1/_{400}$ Daniell-Siemens heruntergedrückt.

Wurde der Strom durch die primäre oder secundäre Spirale eines Inductoriums geleitet, so zeigte ein in den Kreis der inducirten Spirale eingefügtes Dynamometer und ein Galvanometer freilich keine eine Intermittenz andeutenden Ausschläge, indess konnten in Folge der Selbstinduction die Wirkungen der Inductionsstösse zu klein gewesen sein, um wahrgenommen zu werden.

Auch war, als statt der Batterie, der Entladungsröhre und des Flüssigkeitswiderstandes ein Daniell'sches Element und ein so grosser metallischer Widerstand eingeschaltet wurde, dass die Galvanometerablenkung die frühere wurde, die Dynamometerablenkung die gleiche; so dass wiederum die Wirkung intermittirender Ströme ausgeschlossen ist, bei der mit abnehmender Zahl der Ströme die Wirkung am Dynamometer hätte steigen müssen.

Wurde der durch die Entladungsröhre gehende Strom durch eine Wheatstone'sche Drahtcombination geleitet, in deren einem Zweig eine kleine Inductionsspirale von 1700 Q.-E. Widerstand und einem Selbst-

---

$^1/_{1000000}$, $^1/_{100000}$ und $^1/_{1000}$ Secunde die Temperatur nur noch $980 \cdot 10^{-6}$, $815 \cdot 10^{-6}$ und $1{,}4 \cdot 10^{-6}$. Folgen also 1000 Entladungen in der Secunde, so kühlt sich das Gas nach jeder einzelnen fast vollständig ab, folgen 100000, aber nicht mehr.

Hiergegen hat Hittorf (Wied. Ann. 20, p. 707, 1883*) Einwände erhoben, da er sehr viel schwächere Ströme benutzt und die Stetigkeit auch namentlich auf die Constanz der Ladungen eines Condensators basirt habe (siehe §. 625).

[1]) H. Hertz, Wied. Ann. 19, p. 782, 1883*.

inductionscoefficienten gleich 10 Erdquadranten, in deren Brücke ein Dynamometer eingeschaltet war, so erschien keine Ablenkung desselben, wenn ohne die Entladungsröhre ein continuirlicher Strom keine solche hervorbrachte. Hierbei wäre es möglich, dass die Stromschwankungen im Rohre wegen ihrer Kürze nur zum Theil in die Inductionsspirale eindrängen. Deshalb wurden bei weiteren Versuchen ohne Anwendung einer Inductionsspirale die vier Parallelzweige des Apparates aus Glasröhren voll Zinkvitriollösung von je 70000 Q.-E. Widerstand gebildet und die Potentialdifferenz an den Stellen *a* und *b* der Brücke durch ein in dieselbe eingefügtes Elektrometer bestimmt, in welchem die Goldblättchen mit *a*, die dieselben umgebende cylindrische Metallhülle mit *b* verbunden war. Die eine Eintrittsstelle *c* des Stromes in die Drahtcombination und *a* konnten durch kurze Drähte mit den Belegungen eines Condensators von grosser Capacität verbunden werden. Zeigte sich ohne Einschaltung des Condensators kein Ausschlag des Elektroskops, so ergab er sich auch nicht nach der Einschaltung. Wäre der Strom intermittirend, so könnte er aus einem continuirlichen und einem alternirenden Theile zusammengesetzt gedacht werden und für letzteren wären die Widerstände nicht abgeglichen.

Ferner wurden mit der negativen Elektrode durch einen kurzen Draht die Blättchen eines Goldblattelektroskops verbunden, die die letzteren umgebende Metallhülle war durch einen kurzen Draht mit der positiven Elektrode verbunden. Die Goldblättchen divergirten stark. Wurde die Metallhülle aber durch einen grossen Widerstand mit der negativen Elektrode verbunden, so divergirten sie nicht. Auch hier sollten bei schneller Schwankung des Potentials an der Kathode wohl die Goldblättchen, nicht aber die Hülle derselben folgen, so dass bei Discontinuität des Stromes eine Ablenkung hätte erfolgen müssen. Wuchs der Widerstand im Batteriezweige, wobei nach Hittorf's Versuchen die Entladungen discontinuirlich werden, so wurden die Goldblättchen abgelenkt. Also auch dieser Versuch spricht gegen eine Discontinuität. Es lässt sich berechnen, dass, wenn eine solche existirt, in der Secunde mindestens 50 Millionen Partialentladungen erfolgen müssten.

Endlich wurde die eine Platte eines Condensators nach R. Kohlrausch durch einen dicken Draht mit der Anode, die andere durch einen nur 0,06 mm dicken, 80 mm langen horizontalen Silberdraht von 0,8 Q.-E. Widerstand mit der Kathode verbunden. Der Draht ist in der Mitte um einen runden Stahldraht von 0,8 mm Dicke, welcher einen Spiegel trägt, gewunden, durch Drehung desselben gespannt und dann mit ihm verlöthet. Dünnere Stahldrähte sind an den Enden des ersten Stahldrahtes befestigt und werden durch Schrauben an den Enden gespannt erhalten. Wird der Silberdraht durch einen Strom erwärmt, so dreht sich der Stahldraht mit dem Spiegel[1]. Der Strom der Batterie bis zu $^1/_{20}$

---

[1]) Hertz, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 3, p. 17, 1883*; Beibl. 7, p. 548*.

Daniell-Siemens wurde entweder zwischen dem Condensator und dem dünnen Draht oder zwischen letzterem und der Kathode dem Entladungsrohre zugeführt. Im ersten Falle betrug der Ausschlag des mit dem Silberdraht verbundenen Spiegels 4 bis 5, im letzteren kaum $^1/_4$ Scalentheil. Wäre der Strom intermittirend gewesen, so hätte sich der Condensator abwechselnd laden und entladen und dadurch der Silberdraht erwärmen müssen. Bei künstlicher Unterbrechung trat auch letzteres ein. Hiernach würden zum mindesten sehr viele Entladungen in der Secunde erfolgen müssen. Somit ist der Strom der Säule in den Entladungsröhren, so weit man übersehen kann, bei kleineren Widerständen continuirlich.

Auch Hittorf[1]) fand bei Einschaltung eines Telephons, dass der Strom der Säule in den oben erwähnten Fällen je nach den Umständen discontinuirlich oder continuirlich ist. Werden die Elektroden der Entladungsröhre mit den Belegungen eines Condensators (mit Stanniol belegtes, mit Paraffin getränktes Papier) verbunden, so zeigt sich auch an diesem bei continuirlichen Entladungen kein Geräusch, wohl aber bei discontinuirlichen, wobei der Rhythmus dem Tönen des Telephons entspricht.

Dass indess der continuirliche Strom in den Entladungsapparaten in ganz anderer Weise zu Stande kommt, wie in metallischen Leitern, werden wir später besprechen.

625 Verbindet man einen Paraffincondensator mit 42 cm langen und 30 cm breiten Stanniolbelegungen mit den Elektroden, so muss nach Hittorf[2]) der Widerstand verkleinert werden, um die Entladung continuirlich erscheinen zu lassen, da eben hier grössere Elektricitätsmengen geliefert werden müssen, um auf der grösseren Fläche das Potential über dem zu dauernder Entladung erforderlichen Niveau zu erhalten. Bei noch weiterer Verkleinerung des Widerstandes werden die Entladungen wieder discontinuirlich, da sich dann der Condensator plötzlich durch die Entladungsröhre völlig entladet und wieder eine bestimmte Zeit bis zu neuer Ladung vergeht.

Der Grenzwerth des wachsenden Widerstandes, bei welchem die Entladungen erst stetig, dann discontinuirlich werden, ist von der elektromotorischen Kraft der Kette abhängig, aber wenig beeinflusst von der Grösse des Condensators (2 bis 48 Stanniolblätter), da seine Ladung hierbei trotz der Aenderung der Stromintensität durch Veränderung der Widerstandsröhre nahezu constant bleibt, wie man bei plötzlicher Umschaltung der Verbindung beobachten kann, wobei man die Elektroden direct durch ein Galvanometer entladet. Abweichungen hiervon können von der bei abnehmender Stromintensität immer geringeren Ausbreitung des negativen Lichtes auf der Kathode herrühren[3]).

---

[1]) Hittorf, l. c. und Wied. Ann. 20, p. 708, 1883*. — [2]) Hittorf, Wied. Ann. 7, p. 566, 1879*. — [3]) Um hierbei den störenden Einfluss occludirter Gase

626 Zur Einleitung des Durchganges des Stromes einer Säule durch eine Entladungsröhre bedarf es einer bedeutend höheren Potentialdifferenz, als zur Erhaltung des einmal eingeleiteten Stromes. Die erstere Potentialdifferenz kann durch Hindurchschlagen der Entladung einer Leydener Flasche hergestellt werden. So ging nach Versuchen von Hittorf[1]) in einer cylindrischen Röhre von 4 cm Durchmesser mit axialen, 1 cm von einander entfernten Elektroden bei Füllung mit Wasserstoff von $^1/_2$ bis $^3/_4$ mm Druck und Drähten von Eisen und Platin der Strom von 180 Elementen, nach Durchschlagen eines Funkens von bereits 148 Elementen hindurch, bei Aluminiumdrähten ging schon der Strom von 136, bei Retortenkohle von 220 Elementen hindurch. Der grössere oder kleinere Abstand der Elektroden hat wenig Einfluss. (Aehnliche Versuche hatte schon früher Herschel in Betreff der Einleitung des Lichtbogens angestellt, siehe dieses Capitel.)

627 Die quantitativen Verhältnisse beim continuirlichen Durchgange des Stromes der galvanischen Säule durch eine Entladungsröhre entsprechen vollständig den Erfahrungen beim discontinuirlichen Durchgange. — Auch hier hat Hittorf[2]) die Gassäulen mit anderen Leitern parallelisirt und ihren „Widerstand" nach ähnlichen Methoden, wie den der ersteren bestimmt (vergl. hierüber §. 609, 610 und 613 u. flgde.).

628 Hat man durch Einschaltung von passenden Widerständen den durch eine Entladungsröhre gehenden Strom einer Säule continuirlich gemacht und schliesst dabei den Raum der Entladungsröhre ab, so dass der Druck darin unverändert bleibt, so ist der „Widerstand" der Gassäule bei derselben Intensität des hindurchgeleiteten Stromes, unabhängig von der Zahl der Elemente der Säule, der gleiche[2]). Die zum Nachweis benutzten cylindrischen Röhren waren 96 und 44 mm lang und enthielten als Anoden gleiche kreisförmige Platten, als Kathoden 2 mm dicke Drähte, welche später mit dünnwandigen Metallröhren vertauscht wurden (siehe die Anmerkung zu §. 625). Die Röhren standen mittelst Capillarröhren mit der Quecksilberluftpumpe in Verbindung, damit nach der Schliessung der Druck sich möglichst wenig änderte. Bei allen Versuchen erfüllte die Entladung die Röhre möglichst vollständig. Nur die durch das Kathodenlicht erzeugte, mit Zunahme des Stromes rasch wachsende Temperatur an der Kathode verursachte eine Fehlerquelle, namentlich bei sehr verdünnten Gasen und grosser Stromstärke. In den Kreis der Säule wurden nach einander beide Röhren eingeschaltet und die Ablenkungen eines in eine Zweigleitung eingefügten Galvanometers durch Einschalten von verschiedenen Längen der Lösung von Jodcad-

---

zu vermeiden, wendet Hittorf als Kathoden dünnwandige Metallröhren an und leitet zuerst einen viel stärkeren Strom hindurch, als später angewendet wird.

[1]) Hittorf, Wied. Ann. 7, p. 612, 1879*. — [2]) Hittorf, ibid. p. 618*.

mium gleich gemacht. Die Differenz Δ dieser Längen entspricht nach Hittorf der Differenz der Widerstände der Röhren. Wurde bei verschiedener Zahl der Elemente (z. B. 500 und 1000) die Stromintensität gleich erhalten, so blieb Δ ungeändert.

Wurden verschiedene Stromintensitäten und zwar bei so kleinen Drucken benutzt, dass stets das Kathodenlicht die ganze Kathode bedeckte, so waren die Producte aus den Stromstärken i und den Längen Δ nahezu constant (z. B. war $i = 42$ und 80, so war $i\Delta = 16199$ und 16040; war $i = 22{,}25$ und 77, so war $i\Delta = 7552$ und 7523; war $i = 25$ und 76, so war $i\Delta = 4887{,}5$ und 4947,6). Hieraus schliesst Hittorf, dass das „Leitungsvermögen" der Gase proportional mit der Stromstärke wächst.

629 Mit diesem Resultat ist die von Hittorf[1]) beobachtete Vertheilung der Potentiale auf der Länge eines Entladungsrohres beim constanten Durchgange des Stromes einer grossen Chromsäuretauchbatterie von bis zu 1000 Elementen im Einklang.

In eine mit Stickstoff gefüllte cylindrische Röhre von $5^1/_2$ cm Durchmesser und 437 mm Länge werden von der Seite sieben je 2 mm dicke Aluminiumdrähte eingesetzt, und während des Durchganges des Stromes, sobald ein in seine Schliessung eingeschaltetes Telephon seine Continuität anzeigte, mit einem Condensator (19 je 0,6 mm dicke und 60×40 qcm grosse Hartgummiplatten, welche auf 50×30 qcm mit Stanniol belegt und stark zusammengepresst sind) verbunden. Die Stromintensität wird durch einen Jodcadmiumlösungswiderstand regulirt. Der Durchgang des Stromes durch die Röhre wird beim Beginn durch den Schlag der Doppelflasche einer Influenzmaschine vermittelt. Nach einiger Zeit wird der Condensator von den Elektroden losgelöst und unter Einschaltung eines Jodcadmiumwiderstandes durch ein, mit einer Brückenleitung versehenes Galvanometer entladen.

Die Intensitäten sind durch Vergleichung mit dem Silbervoltameter auf Ampères reducirt.

Aenderte sich die Stromintensität von 244 bis 3175, resp. 5789 bis 11192, so änderte sich die Potentialdifferenz zwischen der Anode und Kathode des Rohres von 133 bis 141,5, resp. 150 bis 173. Zwischen äquidistanten Sonden in der positiven Entladung an verschiedenen Stellen änderte sich die Potentialdifferenz nur zwischen den Werthen 12 und 14, dagegen war die Potentialdifferenz im dunklem Raume nur 2,25 bis 4 und 3 bis 4. Somit bleibt bei verschiedenen Stromintensitäten die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden des Rohres constant, wie auch schon Warren de la Rue und H. Müller (§. 622) fanden; ebenso ist dabei die Potentialdifferenz zwischen je zwei in einem bestimmten Abstande befindlichen seitlichen Elektroden in der positiven Entladung con-

---

[1]) Hittorf, Wied. Ann. 20, p. 705, 1883, 21, p. 90, 1884*.

stant; sie ist an verschiedenen Stellen der positiven Entladung die gleiche und nach obigen Physikern im Kohlensäure- und Wasserstoffvacuum auf beiden Seiten einer hellen Schicht 1,243 und 1,229 mal grösser, als auf denen einer dunklen. In dem dunklen Raume ist der Potentialabfall sehr klein (vergl. §. 622), was sich auch zeigt, wenn bei abnehmender Stromstärke der dunkle Raum sich weiter gegen die positive Elektrode erstreckt und die positive Entladung kürzer wird.

Hittorf drückt das erste Resultat wiederum dadurch aus, dass er das Leitungsvermögen der positiven Gasstrecke bei ungeänderter Dichte der Stromstärke porportional setzt.

Die Aenderung der Potentialdifferenz an den Endelektroden des Rohres ist dann durch das negative Glimmlicht bedingt.

630 Mit abnehmender Gasdichte nimmt nach Hittorf die Potentialdifferenz derselben Strecke der positiven Entladung ab, so z. B. war bei den Drucken von 0,6 und 0,2 mm dieselbe 12 bis 14 und 4 bis 4,75, also etwa proportional der Dichte. Dagegen zeigt sich diese Proportionalität nicht an der die Anode selbst enthaltenden Strecke. — Bei stärkerer Abnahme der Dichte (in einem an der axialen Drahtkathode erweiterten Rohr) nähert sie sich indess einem Minimum, indem endlich in der Röhre Quecksilberdampf von einer gewissen, nicht zu vermindernden Spannung zurückbleibt.

631 Auch die durch die Ausbreitung des negativen Glimmlichtes (der Kathodenstrahlen) bedingte Aenderung der Potentialdifferenz in den Röhren hat Hittorf beim continuirlichen Strom untersucht. So lange das negative Licht sich bei fortschreitenden Verdünnungen noch nicht über die ganze Kathode verbreitet hat, bleibt die Dicke des Lichtes und die Spannungsdifferenz constant. Ist die Kathode ganz damit bedeckt, so dehnt sich das Licht mit wachsender Stromstärke weiter aus und die Potentialdifferenz steigt.

Zum Nachweis wurden zwei 6 cm weite, verschieden lange Glasröhren mit gleichen, kurzen axialen Aluminiumdrahtkathoden und verschieden langen axialen, von ersteren 2 cm abstehenden Aluminiumdrahtanoden von 2 mm Dicke und resp. 48 und 6 mm Länge (welche mittelst Specksteinringen von den Röhren isolirt waren) gleichzeitig mit der Luftpumpe verbunden und abwechselnd für jede derselben die Stromstärke und Potentialdifferenz durch den Condensator bestimmt. Bei der langen Kathode blieb, während die Stromstärke bis zum 90 fachen zunahm, die Dicke des Glimmlichtes und die Spannung unverändert, bei der kurzen stieg die Spannung von 50 bis 140 und die Dicke wuchs.

Mit Verdünnung des Gases nimmt die Ausdehnung des Glimmlichtes auf der Kathode bei gleicher Stromstärke zu.

632 Wie bei den Strömen des Inductoriums (§. 484) bedarf es zur weiteren Ausdehnung des Glimmlichtes mit Zunahme der Stromstärke einer

bestimmten Weite des Rohres, welche mit abnehmendem Gasdruck wachsen muss. So betrug die Längsausdehnung auf zwei 12 cm langen, 2 mm dicken Aluminiumdrahtkathoden in zwei Röhren von 10,5 und 1 cm Weite bei 1,45 mm, 0,5 und 0,2 mm Druck resp. 4,5 und 4,5, 12 und 2,5, 103 bis 107 und 139 bis 140 cm.

In den engen Röhren erfüllt das Glimmlicht den Querschnitt nicht ganz.

Da die Ausdehnung des Glimmlichtes cet. par. in der engeren Röhre auf das der Anode zuliegende Ende beschränkt bleibt, nimmt die Spannungsdifferenz für den Durchgang des Stromes bei derselben schnell zu.

633 Der §. 541 u. f. erwähnte grosse Widerstand für den Uebergang der positiven Entladung in der unmittelbaren Nähe der negativen zeigt sich nach Hittorf auch bei dem Durchgange des continuirlichen Stromes. Wird z. B. die Anode aus einem Platinrohr von 2 mm Durchmesser und $^1/_{40}$ mm Wanddicke gebildet, welches einen als Kathode dienenden Platindraht von 1 mm Durchmesser eng umgiebt, so ist schon bei 3,5 mm Druck die zum Durchgange des Stromes erforderliche Potentialdifferenz (58) viel grösser, als zwischen zwei in einem 5,5 cm weiten Glasrohr im Abstande von 17 mm von einander conaxial einander gegenüber liegenden, 2 mm dicken Aluminiumelektroden (48).

634 Bei grösseren Gasdichten und unter Anwendung schwer schmelzbarer Kathoden, z. B. von Platin oder Iridium, verschwindet nach Hittorf bei wachsender Stromstärke, z. B. durch Entfernung der äusseren Widerstände und tieferes Eintauchen der Zinkkohlenplatten der Batterie, beim Erglühen der Kathoden das sie umgebende Glimmlicht, während die entfernteren schwächer glühenden Theile des Platins noch ganz schwach von demselben bedeckt sind. Dabei steigt beim Erglühen der Kathode die Stromstärke und die Spannung an den Elektroden wird nur klein. Die Stromintensität nimmt aber nachher durch Austreten der in denselben occludirten Gase ab, die Spannung zu.

Bei sehr starken Strömen wird dann die Anode heisser als die Kathode (siehe weiter unten einen analogen Versuch von Gassiot). Das in der Röhre befindliche Gas (Stickstoff) ist hierbei auf der ganzen Stromesbahn dunkel (s. w. u.).

Aehnliche Resultate ergab Wasserstoff, in welchem die Spannungsdifferenzen an den Elektroden grösser, die Stromstärken kleiner blieben, und Kohlenoxyd.

Bei Kohlenelektroden in Wasserstoff ergeben sich ähnliche Verhältnisse, die Spannungsdifferenz vermindert sich bei grösseren Stromesdichtigkeiten noch stärker, als bei Iridiumelektroden.

Der hier beobachtete Uebergang aus der gewöhnlichen Gasentladung in die „Lichtbogenentladung“ findet stetig statt. Wir werden die letztere in einem besonderen Capitel behandeln.

635 Nach Hittorf[1]) verändert der Durchgang einer continuirlichen Entladung den Zustand des in einer Entladungsröhre enthaltenen Gases in der Art, dass auch in transversaler Richtung Entladungen leichter hindurchgehen, ganz ähnlich wie dies de la Rive[2]) für den Lichtbogen gefunden hatte. Eine Röhre, Fig. 203, wurde mit zwei seitlichen Ansätzen versehen, in welche in Capillarröhren eingekittete feine Platindrähte eingesetzt waren, deren Enden im Inneren des Rohres 2 mm von einander standen. Durch die Röhre wurde der Länge nach der Strom von 1000 Elementen unter Einschaltung eines solchen Widerstandes geleitet, dass der Lichtstrom die ganze Röhre erfüllte. Dann ging schon der Strom von wenigen Elementen zwischen den transversal gestellten Drähten hindurch, wie sich an der Ablenkung eines eingeschalteten Galvanometers nachweisen liess. Durch Umkehrung der Verbindung der Drähte mit der Kette konnte man die Verzweigung des Hauptstromes in die Nebenleitung eliminiren. Die Intensität des transversalen Stromes ist bis zu 100 Elementen der Zahl derselben proportional; mit der Stärke des Hauptstromes wächst die Ablenkung bei der gleichen Zahl der Elemente der den transversalen Strom liefernden Säule.

Fig. 203.

Liegen die seitlichen Drähte im dunklen Raume, so ist bei gleichem Hauptstrome die durch eine gleiche Zahl von Elementen erzeugte Intensität des transversalen Stromes kleiner, als im leuchtenden Theil der positiven Entladung; dennoch leitet der dunkle Raum, während die daselbst befindlichen Theile ohne den Durchgang des Hauptstromes nicht leiten.

Indess scheinen doch diese Versuche nicht ganz beweisend zu sein, da jedenfalls eine andere Potentialdifferenz zwischen der z. B. positiven Elektrode des longitudinalen Stromes und der negativen Elektrode des transversalen Stromes besteht, als zwischen ersterer und der positiven Elektrode des letzteren und umgekehrt, und so ein Durchgang eines Theils des longitudinalen Stromes durch die transversale Leitung je nach der

[1]) Hittorf, Wied. Ann. 7, p. 614, 1879*. — [2]) De la Rive, Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 26, p. 177. 1866*; Compt. rend. 60, p. 1002, 1685*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] 8, p. 437, 1866*; Pogg. Ann. 131, p. 452*.

Ladung der Elektroden der letzteren nicht ausgeschlossen ist. Wären die letztgenannten Elektroden durch einen kurzen Draht verbunden, so würde bei der geringen Spannungsdifferenz an seinen Enden bei vollkommener Symmetrie für eine solche Abzweigung kaum eine Veranlassung vorliegen.

Für diese Anschauung spricht auch ein Versuch von Warren de la Rue und H. Müller[1]). In kreuzförmigen Röhren, durch deren auf einander senkrechte Theile die Entladungen zweier Säulen A und B von den positiven Elektroden P und P_1 zu den negativen Elektroden N und N_1 gehen, verbreitet sich bei einer Stromintensität von 0,0083 Ampères die erste Entladung der Säule A nur von P bis zur Kreuzungsstelle und dann nach N_1 hin, die Entladung der zweiten Säule B geht von P_1 bis nach N. Bei Einschaltung eines äusseren Widerstandes in den einen Kreis und dadurch erfolgender Verminderung der Intensität darin auf 0,00037 Ampères gehen die Entladungen von P zu N und P_1 zu N_1, indess drücken sich die Schichten der schwächeren Entladung durch die der stärkeren an der Kreuzungsstelle nieder. 636

5. Elektroskopische Ladungen auf der Oberfläche und im Inneren der Entladungsröhren.

Sind die Entladungsröhren relativ lang, so kann eine Wechselwirkung der Elektricitäten an den Elektroden nicht mehr hervortreten. Vielmehr geht die Elektricität der Elektroden auf die umliegende Glashülle über, und auf dieser vertheilt sich die Elektricität in ähnlicher Weise, wie auf der Oberfläche eines die beiden Pole einer Säule verbindenden Leiters (zunächst bei nicht zu niederen Drucken oberhalb des kritischen Punktes). 637

Schiebt man daher auf eine Entladungsröhre an verschiedenen Stellen einen schmalen Ring von Stanniol und verbindet denselben mittelst eines Drahtes für einen Augenblick mit dem Elektroskop, so zeigt dasselbe Ausschläge von positiver und negativer Elektricität, je nachdem man den Ring mehr der positiven oder der negativen Elektrode nähert. Zwischen beiden Elektroden ist ein Indifferenzpunkt. An der Innenseite des Rohres ist also die freie Elektricität in ähnlicher Weise angehäuft, wie auf einem feuchten Leiter. Dieselbe zieht die entgegengesetzte Elektricität in dem Stanniolring an und stösst die gleichnamige ab, welche dem Elektroskop zuströmt.

Der dunkle Raum in der Nähe der negativen Elektrode wirkt sehr schwach influenzirend, selbst wenn er, sowie das über ihm angebrachte Stanniolblatt, eine verhältnissmässig grosse Ausdehnung hat.

---

1) Warren de la Rue u. H. Müller, Proc. Roy. Soc. 35, p. 292, 1883*; Beibl. 8, p. 322*.

Stellt man die Verbindung des Stanniolringes mit dem Elektroskop dauernd her, so schwanken die Goldblättchen des letzteren hin und her, indem nach jeder Entladung im Rohre die aussen vertheilten Elektricitäten sich wieder ausgleichen. Bringt man daher an das Rohr ein zur Erde abgeleitetes Stanniolblatt oder einen Finger, so bildet sich zwischen dem Rohre und dem ableitenden Körper eine Reihe feiner Funken, welche diesen Austausch der Elektricitäten vermitteln und ein knatterndes Geräusch verursachen.

638 Weitere Versuche über die elektroskopische Ladung habe ich[1]) an Capillarröhren angestellt, welche zwischen die die Elektroden umgebenden Glashüllen geschaltet waren, indem an verschiedene Stellen derselben ein Metallplättchen gelegt wurde, welches durch einen dünnen Draht mit dem Goldblatt eines Fechner-Bohnenberger'schen Elektroskopes in Verbindung stand.

Wurde nur die eine Elektrode des Rohres geladen, die andere abgeleitet, so zeigte das ganze Capillarrohr die Elektricität der isolirten Elektrode in abnehmender Stärke gegen das abgeleitete Ende. Die die abgeleitete Elektrode umgebende Glaskugel erschien nicht geladen.

Wenn beide Elektroden der Entladungsröhre isolirt mit den Kämmen der Elektrisirmaschine verbunden und die Hähne an beiden Enden des Entladungsapparates geschlossen waren, so war die der positiven Elektrode zugekehrte Hälfte der Capillarröhre positiv, die der negativen Elektrode zugekehrte negativ geladen; in der Mitte lag ein Indifferenzpunkt.

639 Diesen Vertheilungen der Elektricität entspricht auch die äussere Erscheinung der Entladungen bei Isolation oder Ableitung einer Elektrode[2]).

In einem cylindrischen Rohre von etwa 10 mm innerem Durchmesser und 30 cm Länge, an dessen Enden sich die etwa 3 bis 4 mm im Durchmesser haltenden kugelförmigen Elektroden befinden, kann die Wechselwirkung der Ladungen der letzteren ziemlich vernachlässigt werden.

Bei Isolation der Elektroden breitet sich darin die zuerst von der negativen Elektrode ausgehende Entladung bei sehr schwachen Drucken auf der Glaswand bis zu der positiven Elektrode hin aus, wie sich durch elektroskopische Versuche nachweisen lässt. Die nach Herstellung dieser Vertheilung von letzterer Elektrode ausgehende Entladung erfüllt sofort das Rohr in seinem ganzen Querschnitt, indem sie sich sogleich bis zur entgegengesetzt geladenen Röhrenwand ausdehnt. In der Nähe der negativen Elektrode contrahirt sich die Entladung zu derselben hin und ist von der die Elektrode auf einen etwa 2 mm weiten Raum umgeben-

---

1) G. Wiedemann, Pogg. Ann. 158, p. 69, 1876*. — 2) G. Wiedemann, l. c.

den Lichthülle durch einen kleinen, der Elektrode concentrischen, dunklen Raum getrennt.

Bei stärkerem Gasdruck, bei welchem die von der positiven Elektrode auf die Glaswand bei jeder Entladung übergehenden Elektricitätsmengen bedeutender sind, erstreckt sich die negative Ladung der Glaswand nur bis etwa 6 bis 8 cm von der positiven Elektrode; die positive Entladung bleibt in Folge dessen nahe derselben mit etwas grösserer Helligkeit ziemlich eng contrahirt in der Mitte des Rohres und breitet sich erst allmählich gegen die Wand durch den ganzen Querschnitt aus. Bei Ableitung der negativen Elektrode, bei welcher sich die ganze Röhrenwand mit abnehmender Stärke von der positiven Elektrode an positiv ladet, durchzieht entsprechend die positive Entladung als heller Lichtstreifen eine grössere Länge der Axe des Rohres, und nur schwach breitet sich daneben, sich erweiternd gegen die negative Elektrode hin, die Entladung zur Röhrenwand aus. Bei Ableitung der positiven Elektrode ist die Erscheinung dagegen nicht sehr von der bei Isolation beider Elektroden verschieden; nur geht die Entladung an der positiven Elektrode etwas schneller zur Röhrenwand.

In den Entladungsapparaten mit Capillarröhren zwischen den die Elektroden umgebenden Glashüllen gestalten sich die Vorgänge ganz analog, nur dass in Folge der Form des Apparates die Verhältnisse noch complicirter werden und die Vertheilung der Elektricität im Einzelnen sehr schwer zu verfolgen ist.

Wurde an der positiven oder negativen Elektrode eine kleine Unterbrechungsstelle in den Schliessungskreis eingefügt, so wurden dadurch die Spannungserscheinungen und das Aussehen der Entladungen ebenfalls geändert. Hierzu diente ein mit verdünnter Luft von 0,5 bis 1 mm Druck gefülltes, 30 mm weites und 30 cm langes, cylindrisches Entladungsrohr, an dessen beiden Enden zwei Platindrähte von der Seite her, mit ihren Axen senkrecht gegen die Axe des Rohres, eingeschmolzen waren.

Bei directer und isolirter Verbindung beider Elektroden mit den Zuleitern der Elektrisirmaschine waren beide Elektroden mit hellem blauem

Fig. 204.

Glimmlicht bedeckt; von der positiven an ging eine sich etwas contrahirende Entladung *a*, Fig. 204, aus, die in einiger Entfernung von der Elektrode eine dunkle Stelle *b* zeigte und dann durch das ganze Rohr

sich schwach verjüngend *c*, bis in die Nähe der negativen Elektrode hindurchging, von der sie durch den dunklen Raum *d* getrennt war.

Bei Ableitung der positiven Elektrode wird die dunklere Stelle *b* schmaler, indem die Entladung *a* etwas weiter sich ausdehnt; bei Ableitung der negativen Elektrode wird der dunkle Raum *d* breiter und der Theil *c* der Entladung zieht sich spindelartig gegen denselben zusammen.

Sodann wurde in dem Zuleitungsdraht zu der einen oder anderen Elektrode in der Luft eine kleine Unterbrechungsstelle von etwa $^1/_2$ mm Länge eingeschaltet.

Befand sich die Unterbrechungsstelle an der negativen Elektrode, so trat der dunkle Raum *d* vor derselben viel schärfer und breiter hervor; ebenso zeigte sich dicht an der positiven Elektrode eine schmale dunkle Stelle *b*, von der aus die röthlich leuchtende Entladung *c*, erst sich etwas verjüngend, dann sich wieder ausbreitend bis *d*, das Rohr durchzog.

Wurde die positive Elektrode abgeleitet, so verschwand die dunkle Stelle *b* fast ganz, sonst blieb die Erscheinung ziemlich ungeändert. Wurde

Fig. 205.

die Unterbrechungsstelle vergrössert, so wurde der dunkle Raum *d* breiter; bei sehr grosser Ausdehnung derselben zog sich ein heller Streifen von der untersten Spitze der Elektrode zur übrigen leuchtenden Entladung. Wurde der Zufluss zur negativen Elektrode durch eine Wasserschicht verzögert, so nahm die Ausdehnung des dunklen Raumes *d* mehr und mehr ab.

Bei Ableitung der negativen Elektricität der Elektrisirmaschine vor der Unterbrechungsstelle wurde die dunkle Stelle *b* an der positiven Elektrode schmaler; die folgende Entladung *c* spitzte sich gegen die Mitte des Rohres, wo etwa früher die Contraction stattfand, unter Zunahme ihrer Helligkeit zu; ging aber schon vor ihrer Spitze in eine dunklere, das Rohr erfüllende und durch den sehr scharf und breit gezeichneten dunklen Raum *d* von der negativen Elektrode getrennte Lichtsäule über, Fig. 205.

Befand sich die Unterbrechungsstelle an der positiven Elektrode, so erschien die positive Elektrode mit hellerem Glimmlicht bedeckt, als die negative; von ersterer ging sofort eine graue Lichtsäule aus, welche das ganze Rohr erfüllte, vor der negativen Elektrode sich etwas verjüngte und daselbst an einer gegen letztere sich conoidisch zuspitzenden

Stelle heller wurde; dann aber sich bis zur negativen Elektrode erstreckte, ohne von derselben durch einen dunklen Raum getrennt zu sein, Fig. 206.

Bei Ableitung der negativen Elektrode änderte sich die Erscheinung wenig, nur war die helle Stelle etwas gegen dieselbe vorgeschoben und die Entladung breiter. Bei Ableitung der positiven Elek-

Fig. 206.

tricität der Maschine erschien noch eine etwas dunklere Stelle an der positiven Elektrode. Auch hier war der dunkle Raum an der negativen Elektrode kaum zu erkennen. Bei einer sehr kleinen Unterbrechungsstelle und etwas stärkerem Drucke ging hierbei die Entladung nur zwischen den Enden der Elektroden in einen Bogen über und änderte sich kaum durch Einschaltung einer Wassersäule.

Die Ladung der Wände des Rohres mit freier Elektricität ergiebt sich aus folgender Uebersicht:

Elektrode	Ohne Unterbrechung	Unterbrechung an der + Elektrode	Unterbrechung an der — Elektrode
isolirt	ganzes Rohr —	ganzes Rohr — abnehmend von der — Elekt.	ganzes Rohr + abnehmend von der + Elektr.
+ abgeleitet	abnehmend —	abnehmend stark —	an der — Elektr. schwach —, sonst fast unelektr.
— abgeleitet	abnehmend —	an der + Elekt. schwach +, sonst fast unelektr.	abnehmend stark +

640 Meist vergeht, namentlich bei grösseren und mit Flüssigkeiten umgebenen Röhren nach der Verbindung mit dem Inductorium eine längere Zeit, ehe die leuchtende Entladung in ihnen auftritt, da in Folge der schlechten Leitungsfähigkeit des Glases u. s. f. eine gewisse Zeit nöthig ist, bis sich die zur Bewegung der Elektricität erforderliche Ladung an den Wänden herstellt. Ist dieselbe eingetreten, so erfolgt die Entladung. Unterbricht man dann den Inductionsstrom auf kurze Zeit, so stellt sich die Entladung nach neuer Schliessung sogleich wieder her, indem die Ladung der Wände längere Zeit bestehen bleibt.

Breiten sich in Folge der grossen Länge einer Entladungsröhre die Elektricitäten auf ihrer inneren Oberfläche nur sehr langsam völlig aus und bleibt in Folge dessen die leuchtende Entladung aus, so kann man die Röhre an einer Stelle zwischen den Elektroden ausserhalb mit dem Finger ableitend berühren. Dann häuft sich an dieser Stelle in Folge der Influenz eine grössere Elektricitätsmenge an, die sich weiter ausbreitet und hierdurch oft die Entladung einleitet.

641 Bei Abnahme des Druckes bis zu dem kritischen, bei welchem die Entladungen am schnellsten auf einander folgen, nimmt entsprechend der Abnahme des zum Beginn der Entladung erforderlichen Potentials an den Elektroden auch die freie Spannung auf der Oberfläche der Röhren ab. Bei weiterer Verdünnung wächst dieselbe wieder und kann bei starker Verdünnung so hoch werden, dass bei Annäherung eines Leiters die Röhren leicht durchschlagen werden. Dann zeigen die Röhren, wenn ihre Wände phosphoresciren, an der ganzen Oberfläche positive Elektricität[1]).

642 Die elektrostatische Ladung der Wände eines Entladungsrohres bedingt, dass es sich wie eine Leydener Flasche verhalten kann. Nähert man das eine Ende eines solchen Rohres, in welches eine Elektrode eingeschmolzen ist, dem Conductor einer Elektrisirmaschine, und hält es dabei in der Hand, so laden sich seine Wände innen entgegengesetzt, wie aussen, und bei Berührung der Elektrode mit der anderen Hand erhält man eine Erschütterung.

Bei Röhren mit nicht zu stark verdünnten Gasen sind dabei die Entladungsschläge bei Berührung beider Elektroden gleich stark, bei Röhren mit stark verdünnten Gasen bei der der Kathode stärker[2]). Dementsprechend ändern sich auch die Lichterscheinungen.

Auch schon, wenn man eine evacuirte Röhre ohne Metallelektroden am einen Ende in der Hand hält und das andere Ende dem positiven Conductor nähert, ladet sie sich wie eine doppelte Leydener Flasche, ausserhalb gegenüber dem Conductor positiv, innen negativ, und am abgeleiteten Ende entgegengesetzt. Wird die äussere Fläche ableitend berührt, so vereinen sich die innen vertheilten Elektricitäten unter Lichterscheinung[3]).

643 Berührt man eine Stelle der Wand einer cylindrischen Entladungsröhre mit der Hand oder mit einem abgeleiteten Metallblech, so bewirkt

---

[1]) Hittorf, Pogg. Ann. **136**, p. 30, 1869*. In einzelnen Fällen, bei Anwendung der Influenzmaschine, beobachtete Pšenička (Progr. der Communalrealschule in Karolinenthal bei Prag; Beibl. **6**, p. 136*) negative Elektricität, wobei die Wände nicht leuchteten. Bei Einschaltung einer Funkenstrecke phosphorescirten sie und die Wände wurden wieder positiv. — [2]) Pšenička, l. c. — [3]) Bottomley, Nature, **23**, p. 218, 243, 1880*; Beibl. **5**, p. 217*.

die Influenz der die Röhre durchziehenden positiven Entladung, dass von der Innenseite der Wand an der abgeleiteten Stelle eine negative Entladung ausgeht. Die Stelle verhält sich dann nach Goldstein[1]) wie eine secundäre Kathode, um die sich ein dunkler Raum bildet, von welcher, wie von jeder anderen gleichgestalteten Kathode, auch eventuell bläuliche Kathodenstrahlen ausgehen, die an den von ihnen getroffenen Stellen der gegenüber liegenden Glaswand Phosphorescenz erregen.

In einem cylindrischen Rohre erscheint demnach, wenn die Aussenwand auf einer Seite durch einen axial gerichteten Draht abgeleitet wird, auf der gegenüber liegenden Seite ein grün fluorescirender, der Röhrenaxe paralleler, meist gegen die Enden zugeschärfter schmaler Streifen. Ist das Rohr anders gestaltet, z. B. ellipsoidisch, so entspricht die leuchtende Fläche der durch nahezu senkrechten Austritt von Kathodenstrahlen von der abgeleiteten Wandstelle getroffenen Oberfläche.

Das Verhalten ist ähnlich, wie wenn man innerhalb des Rohres an der abgeleiteten Stelle eine ihr entsprechende Metallkathode angebracht hätte.

644 In Röhren mit stark verdünnten Gasen zeigt sich bei Ableitung irgend einer Stelle der Wand zwischen der positiven und negativen Elektrode Phosphorescenz, so dass auch hiernach die positive Entladung die ganze Röhre durchzieht. Man kann dabei auch beide Elektroden an demselben Ende der Röhren anbringen. Bei Einschaltung einer Funkenstrecke vor der positiven Elektrode, während die negative isolirt ist, durchzieht die positive unipolare Ladung hin und her das Rohr und es zeigen sich dieselben Erscheinungen.

645 Um die Ausbreitung dieser secundären Phosphorescenz bei vermindertem Drucke zu untersuchen, legten Spottiswoode und Moulton[2]) in eine 2 Zoll weite Röhre eine zweite $1^1/_2$ Zoll weite kurze Röhre, aussen um die weitere Röhre ein Stanniolblatt und beobachteten, bis zu welchen Abständen a der Peripherien der Röhren von einander bei verschiedenen Drucken d auf dem inneren Rohr Phosphorescenz auftrat. Für $d = 5$, 22, 24, 26 mm, war $a = 12$, 5, 2 mm, fast Null.

646 Die der abgeleiteten Stelle der Röhrenwand gegenüber auftretende Phosphorescenz (§. 643) kann bei Gasen von ziemlich starker Verdünnung durch jede beliebige Entladung hervorgerufen werden. Ist endlich die Verdünnung so weit getrieben, dass auch der zurückgebliebene leuchtende Nebel verschwindet, so zeigt sich doch an der der abgeleiteten Stelle gegenüberliegenden Wand Phosphorescenz.

---

1) Goldstein, Wien. Ber. 73 [2], p. 463, 1876*. — 2) Spottiswoode und Moulton, Phil. Trans. 1879, 1, p. 561, 1880, 2, p. 165*; Beibl. 8, p. 64*.

Dasselbe geschieht aus dem gleichen Grunde, wenn man die eine Elektrode der Röhre mit dem negativen Conductor einer Holtz'schen Maschine verbindet, deren Pole einen kleinen Abstand von einander haben und nun ein Stanniolblatt an einer Stelle der Röhre durch einen Draht mit der positiven Elektrode der Maschine verbindet. Bei jeder Entladung zeigen sich an jener Stelle Kathodenstrahlen und gegenüber derselben Phosphorescenz, auch in Röhren, in welchen durch Absorption von Kohlensäure durch erhitztes Kali das Gas so stark verdünnt ist, dass sie sonst nicht phosphoresciren.

Ist eine Röhre so weit evacuirt, dass sie auf der der abgeleiteten Stelle gegenüberliegenden Wand phosphorescirt (und die Entladung bei Annäherung eines Leiters abgelenkt wird, s. w. u.), so wird bei Einschaltung von Funkenstrecken die Phosphorescenz noch heller. Im rotirenden Spiegel intermittirt sie, wie die Entladung, sowohl wenn die Funkenstrecke an der positiven, wie wenn sie an der negativen Elektrode eingeschaltet ist.

647 An einer durch Ableitung der Röhrenwand erzeugten secundären Elektrode tritt kein so starker „Widerstand“ für die Entladung auf, wie er sich an einer Metallkathode bildet.

Hierfür sprechen nach Edlund einige Versuche von Plücker, Gassiot und Gaugain.

Als Plücker[1]) längere Zeit durch eine sehr stark evacuirte Röhre mit Platinelektroden den Strom eines Inductoriums leitete, intermittirte bald die Entladung und hörte auf; vermuthlich in Folge der Absorption von Sauerstoff. Wurden dann die Pole des Inductoriums mit zwei nahe den Enden auf die Röhre gelegten Stanniolblättern verbunden, so gingen wieder leuchtende, durch den Magnet als alternirend zu erkennende Entladungen im Rohre über. Nach einiger Zeit konnte man auch wieder durch die Drahtelektroden den Strom leiten.

Ganz ähnlich ist der Versuch von Gassiot[2]). Wird der eine Pol eines Inductoriums mit der einen Elektrode eines Entladungsrohres verbunden, der andere mit einem auf der Röhre angebrachten Stanniolblatt, oder werden beide Pole mit zwei Stanniolblättern auf der Röhre verbunden, so leuchtet nach Gassiot die Röhre noch in Folge der durch Influenz erzeugten Ströme, wenn sie selbst bei directer Verbindung ihrer Elektroden mit den Polen des Inductoriums keinen Strom durchlässt.

Hiernach müsste also der Uebergang des Stromes aus dem Metall der Elektroden in den luftverdünnten Raum einen grossen Widerstand erfahren, und derselbe müsste viel kleiner sein, wenn die Entladung von der Innenwand der Röhre, also der Oberfläche des Glases ausgeht, also direct in dem Gase daselbst beginnt.

---

[1]) Plücker, Pogg. Ann. 105, p. 70, 1858*. — [2]) Gassiot, Phil. Trans. 1859, p. 147*; Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 6, p. 145*.

648 Auch durch directe Versuche hat Edlund[1]) dies bestätigt. In das eine Ende eines 300 mm langen und 16 mm weiten Rohres sind zwei an ihren äussersten Enden um 3 mm von einander abstehende Elektroden eingeschmolzen. Auf dem Rohr sind zwei von einander und von den Elektroden isolirte Stanniolblättchen befestigt. Werden die Elektroden oder die Stanniolblättchen mit den Polen eines Inductoriums verbunden, so gehen bei höherem Drucke nur zwischen ersteren Funken über, unter den Stanniolblättchen zeigt sich kein Licht. Bei abnehmendem Drucke tritt letzteres ebensowohl, wie auch die Funkenentladung auf, welche sich gegen das von den Elektroden entferntere Ende ausbreitet; bei noch weiterer Verminderung des Druckes verschwindet die Funkenentladung zwischen den Elektroden; das Licht zwischen den Stanniolblättchen leuchtet aber hell auf.

Auch leuchtete ein stark evacuirtes, mit dem einen Ende einem geladenen Conductor schnell genähertes und wieder entferntes Rohr auf, ebenso leuchtete es beim Reiben, obgleich durch seine Elektroden der Strom des Inductoriums nicht hindurchging. Bei höherem Druck verschwanden die ersteren Erscheinungen, dagegen leitete das Rohr die letzteren Ströme.

649 Ein Versuch von Gaugain[2]) scheint dies zu bestätigen. In einen sehr stark verdünnten Raum wird zwischen die Elektroden ein Stanniolblatt gebracht. Dann dient bei grösserer Entfernung der Elektroden die eine Seite desselben als positive, die andere als negative Elektrode. Wird aber die eine Elektrode dem Stanniolblatt hinreichend genähert, so dass durch den Strom ein Loch in dasselbe gebohrt wird, so geht die Entladung allein durch dieses und nicht mehr durch das gut leitende Stanniolblatt. Der Strom findet also für seinen Eintritt in dasselbe einen Widerstand.

650 Wie die von zwei benachbarten Metallkathoden ausgehenden Kathodenstrahlen ein wenig divergiren, so geschieht dies auch bei den secundären, von der abgeleiteten Glaswand ausgehenden Kathodenstrahlen.

Fig. 207.

a b

b_1 a_1

Berührt man nach Goldstein zwei Stellen, a und b, der Röhre (Fig. 207), welche dadurch leuchtend für sich einzeln die gegenüberliegenden secundären Lichtflecke a_1 und b_1 erzeugen würden, so liegen die secundären Flecke nicht ganz den primären gegenüber, sondern a_1 und b_1 werden einander ferner gerückt, ganz so, wie wenn die von a und b ausgehenden Strahlen sich abstiessen.

[1]) Edlund, Wied. Ann. 15, p. 514, 1882*; Oeversight af K. Vetensk. Ak. Förhandl. 40, No. 2, 1883*; Beibl. 8, p. 145*. — [2]) Gaugain, Compt. rend. 41, p. 152, 1855*.

651 Auch Moulton und Spottiswoode (l. c.) haben analoge Erscheinungen beobachtet. Nach ihren Versuchen gehen bei Einschaltung von Funkenstrecken die secundären Kathodenstrahlen nicht nur normal, sondern in bedeutend spitzen Winkeln von der abgeleiteten Stelle aus. Wird als ableitender Körper ein Stanniolring genommen und ein Glasstückchen in die Röhre gebracht, so dass seine Verbindungslinie mit der entfernteren Kante des Ringes etwa einen Winkel von 45° mit der Röhrenaxe macht, so entwirft es einen Schatten (siehe §. 654), gerade wie wenn directe Strahlen von der gegenüberliegenden Seite des Ringes zu ihm gegangen wären.

Ein kleines abgeleitetes Stanniolblatt auf einer Stelle eines weiten Rohres entwirft dementsprechend einen Phosphorescenzfleck auf der gegenüberliegenden Seite, welcher der Ausstrahlung der Kathodenstrahlen in einem Kegel von etwa 2 × 20 bis 30° entspricht.

652 Hierbei haben Moulton und Spottiswoode eigenthümliche „Interferenzen" der Kathodenstrahlen gefunden.

Gehen die Strahlen von zwei diametral gegenüberliegenden, mit Stanniolstreifen bedeckten Stellen der Röhre aus, so erscheint in Folge ihrer „Interferenz" keine Phosphorescenz. Aus demselben Grunde tritt sie auch nicht unter einem Stanniolringe, sondern nur auf beiden Seiten desselben auf (was übrigens auch von der Abstossung der Kathodenstrahlen herrühren kann).

Ist die Kathode, ein Draht, in die Seitenwand der Röhre eingesetzt und wird ihr gegenüber der Finger aufgelegt, so entsteht ein Phosphorescenzfleck in Gestalt eines innen scharf begrenzten, aussen unregelmässigen Ringes um die Basis der Kathode. Die von der Kathode ausgehenden Strahlen haben wieder die von der Mitte des Fingers ausgehenden vernichtet und die von der Seite der Kathode schräg ausgehenden verursachen die Phosphorescenz.

653 Legt man an die Wand einer stark evacuirten Röhre bei Einschaltung einer Funkenstrecke an der positiven Elektrode einen ableitenden Körper, den Finger, so verschwindet die durch die auftreffenden Kathodenstrahlen daselbst verursachte Phosphorescenz auf einer Stelle der berührten Fläche und eine Art phosphorescenzfreier Schatten bildet sich darauf gegen die Anode hin, welcher bei kleinen Funken durch eine nahezu der Röhrenaxe parallele, bei grösseren durch eine stark geneigte Ebene begrenzt ist. Die Kante des Schattens erscheint heller als die übrige Röhre, er geht von der der Kathode zuliegenden Seite des ableitenden Fingers oder bei starken Funken noch von einer etwas weiter gegen erstere hinliegenden Stelle aus. — Wird der Finger in der Nähe der negativen Elektrode aufgesetzt, so beginnt der Schatten etwas mehr gegen die positive Elektrode hin.

Diese Erscheinung könnte auch von der Abdrückung der von der negativen Elektrode kommenden Kathodenstrahlen, welche sonst die Wand zur Fluorescenz bringen, durch ähnliche von der Wand kommende Kathodenstrahlen herrühren.

Werden in ähnlicher Weise Glasstückchen in einer Röhre durch den directen Strom zur Phosphorescenz gebracht, so können sie durch diese Abbiegung bei Ableiten einer geeigneten Stelle der Wand dunkel werden.

654 Wenn zwischen die abgeleitete und die gegenüberliegende Röhrenwand ein schattenwerfender Körper, ein Draht, gebracht wird, so entwirft er wie bei gewöhnlichen Kathodenstrahlen, einen Schatten, auch wenn er als Anode dient [1]).

Derartige Schatten haben auch Moulton und Spottiswoode (l. c.) beobachtet, als sie in den Gang der secundären Kathodenstrahlen Tetraeder von Draht brachten. Durch die Abbiegung der Kathodenstrahlen entstehen dann complicirte Figuren (vergl. die Figuren von Goldstein, §. 522 u. flgde.).

655 Bilden sich in Röhren, in welchen nur die eine Elektrode mit dem einen Conductor der Maschine verbunden ist, welchem der andere Conductor gegenübersteht, bei starker Verdünnung abwechselnd gerichtete positive, nahezu lineare Entladungen, deren jede Phosphorescenz erzeugt und werden in den Weg derselben Glasstückchen und dergleichen mehr gebracht, so liegt der Schatten derselben in demselben Normalquerschnitt der Röhre, wie der Gegenstand. Die schattenbildenden Ströme sind also normal zur Röhrenaxe und rühren von der durch die positive Entladung auf der Röhrenwand auf ihrer ganzen Länge influenzirten negativen Elektricität her, welche Kathodenstrahlen aussendet.

Zuweilen geht die positive Entladung in Zickzackform durch die Röhre; dann leuchten alle Stellen, wo sie die Röhrenwand trifft. Bringt man in den Weg derselben, quer durch die Röhre, einen nicht leitenden Körper, so entsteht in gewöhnlicher Weise ein Schatten, ist der Körper ein Leiter, ein Draht, ein Drahtende und dergleichen mehr, so dehnt sich der Schatten bedeutend aus, und noch mehr, wenn der Finger nahe dem anderen Ende des Drahtes von aussen an die Röhre gelegt wird. Diese Ausdehnung kann nur davon herrühren, dass sich der Draht ladet, wodurch von den Röhrenwänden entsprechend eine negative Entladung mit Kathodenstrahlen ausgeht.

656 Ist das positive Licht geschichtet, so zeigt auch hier das von den secundären, das positive Licht transversal durchsetzenden Kathoden-

---

[1]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. 9, p. 160, 1880*, auch Domalip, Sitzungsbericht der königl. Böhm. Akad. 2, Juli 1880, p. 5*; Beibl. 5, p. 152*.

strahlen erzeugte Phosphorescenzlicht auf der gegenüberliegenden Wand helle und dunkle, den positiven Schichten entsprechende Streifen [1]) (vgl. §. 557).

657 Wird analog auf eine Röhre, deren einer Elektrode unter Einschaltung einer Funkenstrecke positive Elektricität von der Influenzmaschine zugeführt wird, während die andere abgeleitet ist, ein etwa zwei Zoll breiter Stanniolstreifen parallel der Röhrenaxe aufgeklebt, so entwirft er ein etwa den halben Umfang der Röhre erfüllendes Phosphorescenzbild, welches gerade gegenüber dem Streifen heller ist und von dem parallele, gegen die Röhrenaxe normale hellere Streifen mit dunkleren, aber auch noch phosphorescirenden Zwischenräumen ausgehen.

Auch verbanden Spottiswoode und Moulton [2]) einen auf eine Entladungsröhre aufgeklebten Stanniolstreifen oder Draht, welcher sich so weit erstreckte, wie die positive Schichtung, mit dem positiven Pol einer Influenzmaschine, deren anderer Pol mit einer der Elektroden der Röhre verbunden war, und leiteten unter Einschaltung einer kleinen Funkenstrecke den Strom einer zweiten Influenzmaschine durch die Röhre. Wirkte nur die erste Maschine, so leuchtete bei jeder Entladung die dem Stanniolstreifen entgegengesetzte Wand der Röhre hell auf; wirkte auch die zweite, so war die helle Fläche an den Stellen, welche den Schichten der positiven Entladung entsprachen, dunkel.

Dabei sind die Schichten etwa um die Hälfte ihres Abstandes ohne die Einwirkung des geladenen Stanniolblattes verschoben.

Reicht das Stanniolblatt über die Schichtensäule hinaus, so vereint sich die negative Entladung an der demselben entsprechenden Innenfläche mit der von der Kathode ausgehenden, und die positive Lichtsäule erscheint um die Länge des Stanniolblattes verkürzt; das Phänomen tritt nicht mehr auf.

Man kann diese Erscheinung als ein Entwerfen von Schatten durch die Schichten des positiven Lichtes ansehen (siehe indess bei der Theorie).

658 Wird der Stanniolstreifen senkrecht zur Röhrenaxe befestigt, so liegen diese Streifen in der Richtung der Röhrenaxe. Ist der Stanniolstreifen kurz, so ist das Phosphorescenzbild in der letzteren Richtung weit ausgedehnt und scheint auf der Richtung des Stanniolstreifens senkrecht zu stehen. Die Enden des Bildes erscheinen in einem rechten Winkel vom Stanniol aus gesehen. Schräge Stanniolstreifen liefern Bilder, welche senkrecht zur Richtung der Tangente an der Stelle des Stanniolstreifens gestreift sind, von welcher sie ausgehen. Diese Streifungen dürften nach Eilhard Wiedemann von kleinen erhabenen Linien

---

[1]) Goldstein l. c. — [2]) Spottiswoode und Moulton, Proc. Roy. Soc. Lond. 32, p. 385, 1881*; Beibl. 7, p. 725*.

auf der Glasröhre herrühren. Ein elliptischer Stanniolstreifen giebt ein seiner Evolute entsprechendes Bild. Bringt man zwei Stanniolstücke an, so interferiren die Kathodenstrahlen (vergleiche die Versuche von Goldstein mit verschieden gestalteten Kathoden).

659 Die Influenz auf leitende Körper, welche den Röhren von aussen genähert werden, wirkt auch auf den Elektricitätsstrom in ihnen zurück. Bringt man zunächst bei nicht zu niederem Druck z. B. an eine Entladungsröhre oder an das elektrische Ei an einer Stelle einen Finger, so neigt sich die durch die Schichtung angedeutete Richtung der Entladung zu der berührten Stelle hin und die Schichtung selbst wird deutlicher[1]).

660 Bei stärkeren Drucken bemerkt man demnach, wenn man der Röhre in der Gegend des positiven Lichtes einen Leiter nähert, beim Durchgange einseitig gerichteter Inductionsströme im Allgemeinen eine Anziehung der Entladung[2]). Dieselbe rührt her von einer Aenderung der Vertheilung der elektrostatischen Ladung, die Röhre wird an der Ableitungsstelle aussen stark negativ geladen und diese Ladung wirkt auf die positive Entladung zurück.

In der Nähe der Kathode hat die Ableitung der Wand unter diesen Verhältnissen keinen Einfluss auf die negative Entladung.

Auch bei Berührung der Wand eines elektrischen Eies kann man diese Erscheinungen beobachten.

661 Bei verminderten Drucken, wenn die Helligkeit des Lichtes nach einer stetigen Zunahme wieder abnimmt, hört die Anziehung allmählich auf, und geht bei weiterer Abnahme des Druckes in eine scheinbare Abstossung über. Auf der der abgeleiteten Wand gegenüberliegenden Stelle der Röhrenwand erscheint Fluorescenzlicht[3]). Dabei verschieben sich die Schichten der positiven Entladung gegen die Anode hin.

Dasselbe habe ich[4]) bereits im Jahre 1876 bei Berührung einer Stelle der Capillarröhre einer Spectralröhre mit einem Drahte beobachtet. Waren die Elektroden beide mit den Polen einer Influenzmaschine verbunden, so änderte sich dabei die Erscheinung kaum, war aber die Kathode abgeleitet, so erschien unter dem Drahte eine gegen die Seite der isolirten positiven Elektrode sich ausbreitende dunkle Stelle, welche um so länger war, je weiter die Ableitungsstelle gegen die abgeleitete Kathode vorgeschoben wurde.

---

[1]) Riess, Pogg. Ann. 104, p. 321, 1858*. — [2]) Riess, l. c., auch Reitlinger und von Urbanitzky, Wien. Ber. 72 [2], p. 685, 1876*; Beibl. 1, p. 416*. — [3]) Reitlinger und von Urbanitzky, l. c. und Moulton und Spottiswoode, Proc. Roy. Soc. 29, p. 21, 1879*; Beibl. 3, p. 643*. Dass eine in eine seitliche Ansatzröhre eines Entladungsrohres gebrachte und abgeleitete Metallkugel wie eine zweite schwächere Kathode wirken muss, ist von vornherein klar. — [4]) G. Wiedemann, Pogg. Ann. 158, p. 69, 1876*.

Bei dickwandigen Röhren tritt dabei, wenn in den Schliessungskreis eine geeignete Funkenstrecke eingeschaltet wird, so dass die Entladung durch den Finger abgelenkt wird (s. w. u.), auch auf der der abgeleiteten Stelle gegenüberliegenden Aussenwand des Rohres eine Phosphorescenz ein [1]).

Die abgeleitete Stelle bedeckt sich immer mit schwach röthlichem Licht, von welchem die positive Entladung durch einen sich bildenden dunklen Raum getrennt ist, so dass sie dadurch scheinbar zurückgedrängt erscheint [2]).

662 Der Grund dieser Erscheinung liegt eben in der Bildung einer secundären Kathode an dem Inneren der abgeleiteten Stelle der Röhrenwand. In Folge des Widerstandes, welchen die von der Anode kommende positive Entladung daselbst findet (vergl. §. 541 u. flgde.), wird sie von der abgeleiteten Stelle abgelenkt.

663 Zur Erzeugung der Abstossung einer Entladung durch einen genäherten Leiter muss in jeder Entladung in kurzer Zeit eine bedeutende Elektricitätsmenge durch die Röhre gehen, sie zeigt sich nicht nach Hittorf, Spottiswoode und Moulton [3]) bei continuirlicher Entladung, was Hittorf [4]) sogar als Criterium für die Continuität und Discontinuität der Entladungen gelten lässt. In allen Fällen, wo die Entladung „empfindlich" ist, kann man die Discontinuität auch durch einen rotirenden Spiegel oder ein mit einem radialen Einschnitt versehenes, vor der Röhre rotirendes Rad oder durch ein in die Schliessung eingeschaltetes Telephon nachweisen. So zeigt sich bei Anwendung von Säulen von grosser elektromotorischer Kraft nach Hittorf [5]) keine Ablenkung der positiven Entladung durch genäherte Leiter; sie erscheint auch nicht beim directen Durchleiten des Stromes der Influenzmaschine. Dagegen zeigt sich die Abstossung, wenn man eine kleine Funkenstrecke in der Luft in die Schliessung einfügt. Mit wachsender Länge des Funkens wächst die Empfindlichkeit der Entladung. Auch kann man den Strom der Maschine durch einen rotirenden Interruptor unterbrechen [6]).

Ebenso wird die Entladung abgestossen, wenn die Enden der Röhre mit der mit einem Condensator verbundenen Inductionsrolle eines Inductoriums in Verbindung gesetzt werden. Wird der das Inductorium erregende Strom geöffnet, und fliessen dann die Elektricitäten des Condensators langsam durch die Rolle zu einander, so verschwindet die Abstossung. Erst wenn bei ziemlich weit vorgeschrittener Entladung des

---

1) Eilh. Wiedemann, l. c. — 2) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 9, p. 23, 1880*. — 3) W. Spottiswoode und F. Moulton, Phil. Trans. 1879, 1, p. 561, 1880, 2, p. 165*; Beibl. 8, p. 64*. — 4) Hittorf, Wied. Ann. 7, p. 566, 1870*; vergl. auch Eilh. Wiedemann, l. c. — 5) Hittorf, l. c. — 6) W. Spottiswoode u. F. Moulton, l. c.

Condensators die Entladungen (in Folge des langsamen Zuströmens aus dem Dielektricum) intermittiren, tritt sie wieder hervor.

Im rotirenden Spiegel erscheint jedes Einzelbild der Röhre gerade, so dass jede Entladung wesentlich momentan ist [1]).

664 Die Abstossung zeigt sich auch, wenn der eine Conductor der Influenzmaschine mit der einen Elektrode der Röhre, der andere mit einer Stelle der Oberfläche der Röhre verbunden wird, und zwischen den Conductoren etwa 15 mm lange Funken überspringen. Von der Innenfläche an jener Stelle gehen dann Kathodenstrahlen aus. Ebenso verhält es sich bei Entladung einer Leydener Flasche durch die Röhre.

665 Wird hierbei ein geladener Nichtleiter oder eine kleine isolirte Metallmasse, ein Stückchen Stanniol einer Entladungsröhre genähert, so lenken sie die Entladung nicht ab, wohl aber ein auf die Röhre oder in ihre Nähe gebrachtes, zur Erde abgeleitetes Stanniolblatt.

Wird dasselbe durch ein Telephon abgeleitet, so hört man bei den empfindlichen Entladungen Töne. Es müssen sich also bei jeder Entladung die Vertheilungen der Elektricität von Neuem in der Röhre herstellen und mit derselben periodisch wieder verlieren können.

Leitet man dabei die eine Elektrode der Influenzmaschine und der Röhre ab, so ändert sich nichts, da die Potentialdifferenz die gleiche bleibt. Wird das Stanniolblatt durch eine Inductionsrolle, in welcher Ströme erregt werden, mit der Erde verbunden, so hat diese selbstverständlich ebenfalls keinen Einfluss, da die Ladungen des Stanniolblattes dabei nicht synchron mit den Inductionsentladungen erfolgen.

666 Die Abstossung kann sich je nach der Menge der von der Innenwand der Röhre entladenen Elektricität in verschiedener Weise zeigen. Nähert man eine nach der Krümmung der Röhre gebogene und abgeleitete dünne Blechplatte derselben allmählich, so entsteht bei weiterer Entfernung im Inneren der Röhre nur eine dunkle Stelle in der Entladung, Fig. 208; bei grösserer Annäherung gehen von der Innenwand Kathoden-

Fig. 208.

a

[1]) W. Spottiswoode u. F. Moulton, auch für die §. 664 bis 673.

strahlen aus, welche von einer dunklen Stelle umgeben sind, gegen die sich die Entladung in zwei dunklen Zungen abhebt, Fig. 209.

Der Uebergang aus der ersten Form in die zweite findet auch statt, wenn man mit dem ableitenden Körper auf der Röhre von der negativen zur positiven Elektrode entlang fährt.

Je näher man der positiven Elektrode kommt, desto schwerer ist es, durch die Entfernung des ableitenden Körpers das Auftreten der Kathoden-

Fig. 209.

strahlen in die einfache Abstossung umzuwandeln. Endlich ist bei Einschaltung kleiner Funkenstrecken zur Seite der positiven Elektrode nur die Abstossung, bei der von grösseren die Bildung des Lichtbüschels wahrzunehmen.

667 Wird der ableitende Körper, ein Stanniolring, durch einen auf der Röhre theilweise entlang geführten Draht mit der positiven Elektrode verbunden, welche durch eine Funkenstrecke mit der Influenzmaschine communicirt, so erscheint unter dem Drahte eine leuchtende Linie auf der Innenseite des Rohres und von der positiven Elektrode geht eine leuchtende, mehr oder weniger scharf abgeschnittene oder abgerundete oder zugespitzte Zunge in die Mitte des Ringes hinein, von dessen Rändern ebenso eine durch einen dunklen Raum von der Zunge getrennte leuchtende Entladung zur negativen Elektrode geht. Bei wachsender Funkenlänge wird die positive Zunge breiter und ändert sich

Fig. 210.

allmählich unter Auftreten eines dunklen, gegen die positive Elektrode vorgeschobenen Kegels in einen gegen den Stanniolring zu immer dünner werdenden, an der Wand der Röhre anliegenden Cylinder um, Fig. 210.

Hier sind die Ladungen des Stanniolringes synchron und gleichnamig mit den Ladungen der positiven Elektrode, während dieselben bei

Ableitung des Ringes ungleichnamig zu der eben vorhergehenden Entladung waren. Dadurch wird an der inneren Glasfläche der Röhre unter dem Ringe negative Elektricität gebunden und die frei werdende positive Elektricität entladet sich gegen die negative Elektrode hin; sie stösst die positive Entladung von den Wänden zurück, welche sich demnach zuspitzt. Da sich mit derselben die negative, auf der Glaswand angehäufte Elektricität ausgleicht, endet die positive Entladung in der Nähe des Ringes; je nach der Menge der bei jeder Entladung zugeführten Elektricität in einem mehr oder weniger zu diesem selbst hin gerichteten, vollen und zugespitzten Cylinder oder einem Hohlcylinder. Erhält der Stanniolring einen immer grösseren Durchmesser, so ändern sich die Erscheinungen, wie beim Uebergang von einer längeren zu einer kürzeren Funkenstrecke.

Bei weiterem Fortschieben des Ringes gegen die negative Elektrode tritt die sonst nur bei grösseren Funkenstrecken beobachtete Bildung des Hohlcylinders schon bei kleineren ein.

Wird zwischen den Stanniolring und die Kathode ein zweiter Stanniolring angebracht, so wiederholt sich die Erscheinung an letzterem. Bei vielen Ringen kann so die ganze Röhre mit einzelnen hellen und dunklen Schichten von Ring zu Ring erfüllt werden, welche von Spottiswoode und Moulton mit den Schichten der positiven Entladung parallelisirt werden.

668 Ist die Funkenstrecke an der negativen Elektrode eingeschaltet und der Ring mit der Erde verbunden, so sind die Verhältnisse dieselben, nur weniger markirt. Hierbei wird von der negativen Elektrode aus positive Elektricität auf dem Glase frei gemacht, welche der Kathode ebenso zuströmt, wie die von der Anode kommende.

Ist der Ring dabei mit der negativen Elektrode verbunden, so entsteht unter demselben ein dunkler Raum, welcher bei wachsender Funkenstrecke wächst, ähnlich wie wenn der Ring und die negative Elektrode abgeleitet und die positive Elektrode unter Einschaltung einer Funkenstrecke geladen werden; die Entladung wird scheinbar vom Stanniolring abgestossen.

669 Wird auf eine Röhre nahe der der Funkenstrecke zunächst liegenden positiven Elektrode eine kleinere und fern von derselben eine grössere mit ersterer verbundene Stanniolfläche (z. B. schmälere und breitere Ringe) gebracht, so zeigt sich unter ersterer starke Abstossung, unter der zweiten schwache Anziehung der Entladung. Ist umgekehrt die grössere Stanniolfläche zur Seite der Funkenstrecke, so zeigt die erstere schwache Abstossung, die zweite starke Anziehung der Entladung.

Hierbei wird positive Elektricität auf der ersten Stanniolfläche frei, welche sich zur zweiten Fläche begiebt, auf der inneren Glaswand negative Elektricität fesselt und positive Elektricität frei macht.

670 Verbindet man die Endelektroden einer cylindrischen Entladungsröhre mit den Conductoren einer grösseren Influenzmaschine ohne Einschaltung einer Funkenstrecke, wobei die Entladung unempfindlich ist, und einen um ihre Mitte gelegten Stanniolring mit der einen Elektrode einer andererseits abgeleiteten zweiten Influenzmaschine, deren Elektroden einander nahe stehen, so wird der Stanniolring abwechselnd langsam geladen und plötzlich entladen, und entsprechend die innere Röhrenwand unter demselben. Die Erscheinung ist dann, wie zu erwarten, dieselbe, wie wenn die eine Elektrode der Röhre und der Ring durch eine Funkenstrecke mit einer Elektricitätsquelle verbunden, die andere Elektrode abgeleitet würde, indem sich die durch beide Maschinen verursachten Entladungen über einander legen. Zugleich ist der Röhrentheil zwischen dem Ringe und der abgeleiteten Elektrode bei richtiger Anordnung der Versuche empfindlich, der andere Theil unempfindlich. Ebenso verhalten sich Röhren, welche zwischen dem einen oder anderen Theile der erst erwähnten Röhre und der Zu- oder Ableitung eingefügt werden.

671 Man kann ohne Schwierigkeit untersuchen, ob in einer Röhre die Entladungen die für die Empfindlichkeit gehörige Intermittenz besitzen oder nicht, wenn man auf ihre Mitte ein Stanniolblatt bringt und es mit einem eben solchen Ringe verbindet, welcher auf die Mitte einer Normalröhre von bekannter Empfindlichkeit gelegt ist. Durch beide Röhren werden getrennte Elektricitätsströme geleitet. Je nachdem sich in der Normalröhre Empfindlichkeit zeigt oder nicht, ist in der ersten Röhre die Entladung empfindlich oder nicht.

Wird der Stanniolring auf irgend eine Stelle der zu untersuchenden Röhre gebracht, die eine Elektrode abgeleitet, und der anderen unter Einschaltung einer Funkenstrecke positive Elektricität zugeführt, so zeigt die Lichterscheinung (Bildung eines Kegels) in der Normalröhre, dass die ganze Oberfläche der Röhre positiv geladen ist; wird der isolirten Elektrode ebenso negative Elektricität zugeführt, so zeigt die Abstossung, resp. Bildung von Kathodenlicht in der Normalröhre, dass die ganze Oberfläche der Röhre negativ geladen ist.

Da die Entladung auf der ganzen Länge der Röhren bei Ableitung der einen (A) und Elektrisirung der anderen Elektrode (B) unter Einschaltung einer Funkenstrecke empfindlich ist, so kann man annehmen, dass die Entladung von der Elektrode B durch das ganze Rohr geht und sich erst bei A mit der influenzirten Elektricität derselben ausgleicht (vergl. §. 638 u. flgde.).

672 Wird eine Röhre immer weiter ausgepumpt, während die Entladungen unter Einschaltung eines Funkens an der positiven Elektrode hindurchgehen, so wird die positive Entladung immer schmaler bis zu einer ganz dünnen Lichtlinie, welche bei der Annäherung eines Conductors von der Seite äusserst empfindlich ist und gegen die gegenüber-

liegende Fläche der Wand gedrückt wird. Daselbst erregt sie einen um so helleren Phosphorescenzstreifen, je näher der ableitende Körper der Wand gebracht wird. Ebenso phosphorescirt unter einem ableitenden Finger die Glaswand.

Wirkte die Abstossung von allen Seiten des Rohres gleichmässig, so müsste die Entladung in der Mitte des Rohres verlaufen, was zuweilen bei gewöhnlichen Röhren eintritt, welche sich von der Anode aus positiv laden. Da ihr von allen Seiten der Röhre Kathodenstrahlen zuströmen, so phosphorescirt unter ihr die Röhrenwand. In der Nähe der negativen Elektrode biegt sie sich gegen die Röhrenwand um.

Nähert man der Röhre seitlich von der gegen die Wand gedrückten dünnen positiven Entladung einen abgeleiteten Körper, einen geraden, der Röhrenaxe parallelen Draht, so kann man häufig die grüne Phosphorescenz darunter nach der dem Körper entgegengesetzten Seite ablenken.

673 Lässt man aus den beiden Enden einer Inductionsrolle die entgegengesetzten Elektricitäten gleichzeitig beiden Elektroden zuströmen, wobei nur der Oeffnungs- oder nur der Schliessungsstrom verwendet zu werden braucht, so begegnen sich die von beiden Elektroden ausgehenden Entladungen an einer Stelle des Rohres. Dort ist die Empfindlichkeit der Entladung am kleinsten. Ein mit einem dort befindlichen Stanniolstreifen verbundenes und andererseits zur Erde abgeleitetes Telephon giebt kaum Töne. Die Empfindlichkeit nimmt dann gegen die Enden hin zu, ähnlich, wie wenn Funkenstrecken an beiden Enden eingefügt werden. Wird dabei ein auf die Röhre nahe der einen Elektrode gebrachter Stanniolstreifen mit dieser oder der anderen Elektrode verbunden, so sind selbstverständlich die Erscheinungen verschieden [1]).

674 Aehnliche Aenderungen der Empfindlichkeit, Aufhören derselben bei Ableitung einzelner Stellen der Röhre hat Eilhard Wiedemann [2]) beobachtet. Ein 5 m langes, 5 mm weites Rohr war auf einer Strecke von 0,5 m mit einem spiralförmigen Stanniolstreifen umzogen. War die Entladung durch eine Funkenstrecke empfindlich, so erschien bei Ableitung des Stanniolstreifens an der ihm gegenüber liegenden Wand eine von der positiven isolirten Elektrode zu der negativen hin bis zum Verschwinden schwächer werdende Spirale von Phosphorescenzlicht. An

---

[1]) Weitere complicirte Versuche, bei denen zwei Röhren neben einander unter Einschaltung einer Funkenstrecke mit den Conductoren der Influenzmaschine verbunden sind und nur die eine ganz, die andere aber in einem Lichtkegel nur zum Theil von der Entladung durchzogen ist, also sich wahrscheinlich die Elektricität in letzterer vor dem Durchgange zurück entladet, und ähnliche Versuche an einer Röhre mit einer mittleren Elektrode und zweien an den Enden vergl. die Originalabhandlung. — [2]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 235, 1880*.

Stellen, die zwei und mehr Meter von der Stanniolspirale entfernt waren, erschien durch Anlegen des Fingers kaum noch Phosphorescenz.

6. Thermische Wirkungen der Gasentladungen.

675 Der die Gase durchfliessende Elektricitätsstrom erwärmt dieselben, sowie die Elektroden, durch welche er in sie eintritt.

Leitet man längere Zeit durch eine Spectralröhre die Entladungen einer Influenzmaschine oder eines Inductoriums, so bemerkt man schon bei Berührung mit dem Finger die Steigerung der Temperatur des engeren Theiles.

676 Die Gesetze der Erwärmung durch die positive Entladung habe ich selbst[1]) zuerst studirt.

Die Entladungsröhren Fig. 211 wurden in einen Glaskasten von etwa 10 cm Breite und Höhe eingelegt. Auf die oberen Ränder des-

Fig. 211.

selben war mittelst zweier Nuthen quer ein Holzbrett *A*, Fig. 212, aufgelegt und daselbst durch einen den Glaskasten umfassenden Kautschukring festgehalten. Dasselbe trug einen aus Holzstäbchen gebildeten Bügel. In dem Brett und dem Bügel verschob sich ein durch Feder *f* nach unten gedrückter, durch den Vorreiber *d* festzustellender Draht *d*, welcher an einem Messingbügel *e* ein aus einem Neusilber- und einem Eisendraht zusammengesetztes lineares, durch Elfenbeinkeile isolirtes Thermoelement trug. An die Drähte des Thermoelementes waren Kupferdrähte gelöthet, die zum Galvanometer führten. Die Löthstellen waren, um ihre Temperatur constant zu erhalten, in ein Glas *g* voll Oel gesenkt. Einer der Kupferdrähte war hierbei mit der Erde verbunden, um die elektrische Ladung des Galvanometers durch die auf der Oberfläche der Entladungsröhren angehäufte Elektricität zu verhindern. Ein ⊏förmiges Schutzblech war um das Thermoelement herumgelegt, während es seine

---

[1]) G. Wiedemann, Ber. d. K. Säch. Ges. d. Wiss. Math.-phys. Classe, 1876, 12. Febr., p. 17*; Pogg. Ann. 158, p. 57, 1876*.

höchste Stellung einnahm, um es vor der Strahlung von der Entladungsröhre her zu schützen.

Durch die Röhren wurde der Strom einer durch einen Hydromotor getriebenen Influenzmaschine längere Zeit geleitet, sodann das Schutzblech entfernt und das Thermoelement auf die Röhre hinabgelassen, welche mit seiner Längsaxe einen Winkel von 90° machte.

Fig. 212.

Bei jedem Versuch wurde der Druck p des Gases in der Röhre, die an einem Galvanometer abgelesene Intensität I des hindurchgehenden Stromes, die Zahl z der Umdrehungen des Triebrades des Hydromotors in je 30 Secunden und der Ausschlag t des mit dem Thermoelement verbundenen Galvanometers, sowie der Abstand y der Entladungen an der heliometerartigen Vorrichtung Figur 192, S. 461, gemessen.

Aus den Zahlen t und y wurden die Werthe t_1 und y_1 berechnet, welche unter der Voraussetzung der Proportionalität der Erwärmungen mit der Intensität der durch die Röhren geleiteten Ströme und der umgekehrten Proportionalität der Abstände der Entladungen mit deren Intensität und der Umdrehungszahl der Scheibe der Maschine sich ergeben würden, wenn die Intensität des Stromes bei 50 Umdrehungen des Triebrades des Hydromotors in 30 Secunden gleich 80 wäre.

Wir führen nur einige Beobachtungsreihen an:

Capillarrohr 1,5 mm weit, äusserer Durchmesser 5,65 mm, mit Wasserstoff gefüllt. Länge der Röhre $l = 177$ und 105 mm.

$l = 177$ mm				$l = 105$ mm			
p	I	t	t_1	p	I	t	t_1
4,2	88	34	29,5	5,6	85,2	35	33
15,8	88,5	93	84,1	20,2	83	97	93
30,2	88	140	127,3	36,4	79,5	139	140
47,3	82	166	162	52	80	163	162
62,5	82,5	193	187	61,5	80	186	192
72	79	207	210	80,6	79	212	215

Capillarrohr 0,74 mm weit, äusserer Durchmesser 5,25 mm. $l = 177$ und 105 mm. Es ist $t_{II} = 5{,}25\, t_I / 5{,}65$.

$l = 177$ mm				$l = 105$ mm			
p	I	t_I	t_{II}	p	I	t_I	t_{II}
3,5	78	44	41,3	4	73	43	40,1
19,2	75	102	96,0	14	88,7	91	85,4
34	81,7	150	140,5	23	88	122	114,2
50,7	80	183	167	40,1	86,2	173	162
—	—	—	—	54	86,7	216,5	193,7
—	—	—	—	85	75	239	224

Zwischen die die Elektroden umgebenden Glaskugeln wurde ferner ein Capillarrohr von 180 mm Länge und 1,5 mm innerem und 5,6 mm äusserem Durchmesser eingefügt. Die Erwärmung desselben wurde abwechselnd nahe der die positive und der die negative Elektrode enthaltenden Glaskugel gemessen. Die mit der Elektrisirmaschine verbundene Elektrode ist mit a, die abgeleitete mit b bezeichnet.

Elektrode a	p	I	t_I	
+	56	91,5	141	nahe a
—	„	87	165	nahe a
—	„	86	158	nahe b
+	„	85	138	nahe b

Das zwischen die Elektrodenkugeln eingefügte Capillarrohr bestand bei anderen Versuchen aus zwei in einer geraden Linie liegenden und an einem Ende mit einander zusammengeschmolzenen Röhren von je 85 mm Länge und (*A*) 1,43 mm innerem und 5,5 mm äusserem Durchmesser und (*B*) 0,73 mm innerem und 5,2 mm äusserem Durchmesser. Die negative Elektrode der Elektrisirmaschine war mit der isolirten Elektrode *a* des Entladungsapparates verbunden, die andere Elektrode *b* desselben abgeleitet. Die Temperaturerhöhung wurde etwa in der Mitte einer jeden der beiden Röhrenhälften bestimmt. Der Werth t_{II} ist $t_{II} = 5{,}2/5{,}5\, t_I$.

A an *a*, *B* an *b*. | *B* an *a*, *A* an *b*.

Thermo-element an	p	I	t_I	t_{II}	Thermo-element an	p	I	t_I	t_{II}
B	17,9	79,2	101	95,5	*B*	18,6	77	105	99,1
A	17,9	76,5	94	—	*A*	18,6	75,1	93	—
A	46	70,7	157	—	*A*	36,8	74	152	—
B	46	75,5	164	155	*B*	36,8	72	170	160,7

Da der Durchgang der Elektricität durch die Entladungsröhren in einzelnen Entladungen erfolgt, zu deren Beginn eine bestimmte Ladung der Elektroden erforderlich ist, und also die Zahl der Entladungen in der Zeiteinheit der Menge I der in derselben den Elektroden zugeführten Elektricität entspricht, so muss die unter gleichen Umständen durch die Entladungen erzeugte Wärmemenge I proportional sein, es lässt sich also die einer bestimmten Intensität I, z. B. 80 entsprechende Wärmemenge t_I durch Multiplication der beobachteten Wärmemenge t mit $80/I$ berechnen.

Die Temperatur der Capillarröhren wird constant, wenn die ihnen durch die Entladungen von Innen zugeführte Wärme der auf der Oberfläche der Röhren ausgestrahlten und an die Luft abgegebenen gleich ist. Da letztere innerhalb der engen Temperaturgrenzen bei den Versuchen für die Längeneinheit der Oberfläche der Röhren proportional ist, so erscheinen bei gleicher Wärmezufuhr von Innen die Röhren von geringerem äusserem Durchmesser d_I heisser, als die von grösserem Durchmesser d. Um daher die bei ersteren beobachteten Erwärmungen t_I der Röhren mit denen bei letzteren vergleichen zu können, müssen sie mit d_I/d multiplicirt werden. Hierdurch ergeben sich die Werthe t_{II}.

Aus diesen und manchen anderen Versuchen lassen sich zunächst direct folgende Resultate ableiten: **677**

Die Temperaturerhöhungen der Capillarröhren nehmen bei gleicher Elektricitätszufuhr mit wachsendem Gasdruck, so wie mit der dabei für

jede einzelne Entladung erforderlichen Elektricitätsmenge im Allgemeinen immer langsamer zu.

Dabei ist bei bestimmten mittleren Drucken ein relatives Maximum der Temperaturerhöhungen, ähnlich wie für die zu jeder einzelnen Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen, nicht deutlich zu beobachten. Dagegen nimmt die durch jede einzelne Entladung hervorgebrachte Temperaturerhöhung ($const\ t_1 y_1$) zuerst langsamer und zwar in etwas geringerem Verhältniss, als das Ansteigen des Druckes, bis zu dem Drucke zu, bei welchem auch das relative Maximum der Entladungsabstände erfolgt; bei höherem Druck nimmt die Temperaturerhöhung durch jede Einzelentladung viel schneller zu, als vorher, aber nahezu proportional der Zunahme des Druckes.

So lange bei geringeren Drucken die zur Erzeugung einer Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen im Stickstoff und Wasserstoff unter sonst gleichen Umständen von einander wenig verschieden sind, sind es ebenso auch die Temperaturerhöhungen der mit jenen Gasen gefüllten Capillarröhren. Bei höheren Drucken, bei welchen für jede Entladung im Stickstoff grössere Elektricitätsmengen erforderlich sind, als im Wasserstoff, ist auch die Temperaturerhöhung in ersterem bedeutender.

Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Erwärmung jedes einzelnen Querschnittes eines kürzeren oder längeren Capillarrohres, welches zwischen die die Elektroden umgebenden weiteren Glashüllen eingeschaltet wird, nahezu die gleiche, selbst wenn die Längen im Verhältniss von 1:1,78 geändert werden. Dabei ist die äussere Erscheinung der Entladung an den Elektroden bei längeren und kürzeren Capillarröhren unter sonst gleichen Verhältnissen kaum von einander verschieden.

Bei längeren Röhren nimmt indess die Erwärmung von der mit der Elektrisirmaschine verbundenen gegen die abgeleitete Elektrode hin ein wenig ab. Bei relativ sehr langen Röhren tritt dies namentlich hervor, wenn die isolirte Elektrode der Röhren positiv geladen ist. Man bemerkt sodann einen mit starken Drucken immer weiter von der Seite der abgeleiteten Elektrode sich im Capillarrohr ausbreitenden dunklen Raum, dessen Temperatur wesentlich niedriger ist, als die der helleren Stellen.

Röhren von verschiedenem inneren, aber gleichem äusseren Durchmesser erhalten in gleichen Zeiten durch die Entladungen unter sonst gleichen Umständen nahezu gleiche Wärmemengen, selbst wenn der Querschnitt des Entladungsraumes im Verhältniss von 1:4 zunimmt. Dies zeigt sich sowohl bei nach einander folgender Einschaltung verschieden weiter Capillarröhren, als auch eines an verschiedenen Stellen ungleich weiten Rohres zwischen die Elektroden.

678 A. Naccari und M. Bellati[1]) haben die von mir erhaltenen Resultate in folgender Weise mittelst des Inductoriums bestätigt.

---

[1]) Naccari u. Bellati, Atti del Ist. Venet. [5] 4, p. 1, 1878*; Beibl. 2, p. 720*.

Spectralröhren, bestehend aus einem engeren Rohr, welches zwischen zwei weiten, conaxialen, cylindrischen Glasröhren eingesetzt war, die an ihren Enden die Elektroden enthielten, wurden mit der 100 000 m Draht haltenden Inductionsrolle eines grossen Ruhmkorff'schen Inductoriums unter Einschaltung eines Galvanometers verbunden.

Durch einen Siemens'schen Zähler ergab sich die Zahl der Unterbrechungen des inducirenden Stromes zu 13,85 in der Secunde, während die Schwingungsdauer der Galvanometernadel 1,81 Secunden betrug.

Bei einer Versuchsreihe wurde der eine Pol des Inductoriums zur Erde abgeleitet, der andere mit dem mit Chlor gefüllten, vertical gestellten Entladungsrohr, dieses mit dem Galvanometer verbunden und letzteres andererseits ebenfalls abgeleitet.

Der mittlere Theil des Rohres hatte 78 mm Länge und 5,5 mm Dicke. Ueber dasselbe wurde als Calorimeter ein cylindrischer, mit Wasser gefüllter Recipient von dünnem Kupferblech geschoben, derselbe beiderseits mittelst durchschnittener Korke luftdicht geschlossen und seine Erwärmung q durch ein eingesenktes Thermometer von Minute zu Minute bestimmt. War z. B. der Ausschlag des Galvanometers I, die Zahl der Unterbrechungen n, so ergab sich z. B. bei zwei Reihen:

n	I	$q.10^4$	$q/I.10^6$	n	I	$q.10^4$	$q/I.10^6$
10	31,9	317	993	17	70	268	383
13	52,4	521	995	19	155,1	587	394
12	67,2	663	959	18	202,0	795	378
11	95,8	922	962	—	—	—	—

Aehnliche Resultate wurden bei Benutzung eines Stimmgabelinterruptors, bei Anwendung von Kohlensäure und Wasserstoff in den Röhren, resp. von Quecksilber in einem Calorimeter von Glas gefunden, so dass also, wie ich bereits gezeigt hatte, das Verhältniss der erzeugten Wärmemengen zu der durch die Röhren hindurchgegangenen Elektricitätsmengen constant ist.

Bestand der mittlere Theil des mit Luft gefüllten Rohres aus zwei verschiedenen Theilen von 36,3 und 12,6 qmm Querschnitt, über welche zwei Calorimeter geschoben waren, so waren doch die aus den Erwärmungen und Wasserwerthen der Calorimeter berechneten, beiderseits erzeugten Wärmemengen q und q_1, wie bei meinen Versuchen, nur wenig verschieden; bei dem engeren Rohr waren sie etwa um 1,05 bis 1,15 mal grösser als im weiteren. Bei einem U förmigen Rohr, dessen Schenkel sehr verschieden weit waren (resp. 116,8 und 4,5 qmm Querschnitt hatten), war die Erwärmung im engeren Rohr nur etwa 1,2 mal grösser als im 679

weiteren. Die Abweichung von der Proportionalität mit dem Querschnitt ist also nur gering, da eine Zunahme desselben im Verhältniss von 1:26 nur einer Abnahme der Wärmeerzeugung im Verhältniss von 1:1,2 entspricht (wobei auch noch die Verschiedenheit der secundären Umstände an beiden Stellen, z. B. die verschiedene Ableitung oder Zuleitung und Strahlung der Wärme von und zu den ausserhalb der Calorimeter liegenden Theilen der Röhren u. s. f., vor Allem auch die Influenzwirkung der Kupferhülle und des Quecksilbers, in Betracht zu ziehen ist).

680 Weitere Untersuchungen über die Gesammterwärmung eines Entladungsrohres und seiner einzelnen Theile wurden von Eilhard Wiedemann[1]) mit verschiedenen Röhren von der Form Fig. 213 und 214 angestellt, in welchen die die Aluminiumelektroden tragenden Drähte von Röhren voll Quecksilber umgeben waren.

Durch diese Röhren, welche in trogförmigen, mit Terpentinöl gefüllten und mit weiten doppelwandigen Blechgefässen umgebenen Glascalorimetern von etwa 50 ccm Inhalt lagen, wurde der Strom einer Töpler'schen Maschine mit 20 Scheiben (vergl. Band II, §. 287) geleitet. Ein Galvanometer mit Kautschuk überzogenem Draht diente zur Messung der mittleren Stromintensität. Zur Zählung der Entladungen wurde das Rohr in einem rotirenden Spiegel gleichzeitig mit einem ihm parallelen Spectralrohr beobachtet, durch welches die Entladungen eines Inductoriums geschickt wurden, dessen inducirender Strom durch eine elektromagnetische Stimmgabel von 100 Schwingungen in der Secunde unterbrochen wurde, und die Zahl der zwischen je zwei Entladungen des letzteren Rohres fallenden Entladungen des ersten Rohres bestimmt. Die Beobachtungen wurden für die Ausstrahlung in bekannter Weise corrigirt.

Fig. 213.

Fig. 214.

Die Erwärmungen waren, wie schon früher beobachtet war, den Galvanometerausschlägen proportional.

Bezeichnet p den Druck, so ergab sich z. B., je nachdem die positive oder negative Elektrode mit der Maschine verbunden und die andere abgeleitet war, die Gesammterwärmung w_+ oder w_-, berechnet auf einen Galvanometerausschlag 100, bei zwei Röhren, bei welchen (I) die Elektroden sich direct in einer weiteren Röhre, Fig. 213, befanden und (II)

---

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 202, 1880*.

die die Elektroden umgebenden Räume durch ein 1 mm weites und 30 mm langes Capillarrohr verbunden waren (Fig. 214).

Rohr I.						Rohr II.		
Luft			Wasserstoff			Wasserstoff		
p	$w+$	$w-$	p	$w+$	$w-$	p	$w+$	$w-$
680	1,15	1,02	680	1,03	0,90	184	3,10	2,76
360	0,80	0,55	350	0,56	0,58	15	0,61	0,62
14,9	0,40	—	126	0,27	0,25	0,4	0,43	0,45
32,4	0,16	0,18	34,6	0,11	0,10	1,3	0,134	0,15
11	0,06	0,066	11,7	0,055	0,06	sehr klein	0,73	0,48
3,7	0,056	0,065	3,9	0,060	0,06			
0,4	0,065	0,081	1,5	0,063	0,062			
sehr klein	1,25	1,01	0,1	0,26	0,33			
—	—	—	sehr klein	0,85	0,50			

In dem ersten Rohr betrug für Wasserstoff die Zahl z der Entladungen für

p	660	365	126	sehr klein
z	45	75	180	50

In Luft zeigt sich derselbe Gang, nur sind die Zahlen z kleiner.

681 Da, wie wir schon §. 577 erwähnten, cet. par. mit abnehmendem Druck das zu einer Entladung erforderliche Potential erst ab- und dann wieder zunimmt, so nimmt auch hier die Zahl der Entladungen bei gleichen in der Zeiteinheit durchgehenden Elektricitätsmengen erst zu und dann wieder ab. Geht bei einer Entladung durch den Apparat die Elektricitätsmenge e und ist das zur Entladung erforderliche Potential V, welches nach derselben auf Null sinkt, so ist die Erwärmung $W = const\, e . V$. Ist bei gleichem Elektricitätsdurchgang die Zahl der Entladungen n, also das Potential vor einer jeden derselben V/n, und die in jeder Entladung entladene Elektricitätsmenge e/n, so ist die Wärmeerzeugung bei n Entladungen gleich $W = const\, n . e/n . V/n = const\, V e/n = const\, W/n$.

Wächst also mit abnehmendem Druck cet. par. erst die Zahl der Entladungen langsam und nimmt dann sehr schnell wieder ab, so muss auch dabei erst die Wärmemenge langsam abnehmen und dann sehr schnell wieder zunehmen, wie es die Versuche ergeben. Dabei ist ganz entsprechend der kleineren Entladungszahl in der Luft gegenüber dem Wasserstoff auch cet. par. die Erwärmung im letzteren kleiner.

Ferner ist im Allgemeinen die Gesammterwärmung bei Ableitung der negativen Elektrode grösser, als bei Ableitung der positiven, wieder dem entsprechend, dass im ersten Fall, also wenn die positive Elektrode direct geladen wird, die Zahl der Entladungen cet. par. eine kleinere ist.

682 Werden Funkenstrecken von der Länge $l = 0$ und 10 mm zwischen den Conductor der Maschine und z. B. die positive Elektrode eingeschaltet, so sind die bei derselben durchgehenden Elektricitätsmengen erzeugten Wärmemengen w_0 und w_{10} nicht mehr umgekehrt proportional den Zahlen z_0 und z_{10} der Entladungen. So ist bei verschiedenen Drucken p

p	z_0/z_{10}	w_0/w_{10}
180	10:1	1:2
90	17:1	1:3
30	50:1	1:6

Der Grund hiervon ist der folgende[1]: Denkt man sich die Elektricität den Elektroden durch so schlechte Leiter zugeführt, dass während der Entladung von der kritischen Stelle, welche allein die Elektrode bilde, keine merklichen Elektricitätsmengen der letzteren aus der übrigen Leitung zuströmen können, so geht eben nur die zur Erhebung der kritischen Stelle auf den zum Beginn der Entladung erforderlichen Antrieb nöthige Elektricitätsmenge bei jeder Entladung über. Die Entladung kann dann als „normal“ bezeichnet werden (vgl. §. 551). Ist aber das mit der kritischen Stelle verbundene Leitersystem grösser, resp. die Zuleitung von demselben besser, so ist die bei jeder Entladung übergehende Elektricitätsmenge grösser, als dem normalen Zustande entspricht. Dasselbe tritt ein, wenn in den Schliessungskreis eine Funkenstrecke eingeschaltet ist, durch welche plötzlich eine grössere Elektricitätsmenge zu der Elektrode des Entladungsrohres gelangt, als zur normalen Entladung erforderlich ist. Die Entladung erfolgt also bei einem relativ kleineren Potentiale, als durch statische Anhäufung der ganzen, bei jeder Entladung der Elektrode zugeführten Elektricität auf der kritischen Stelle allein bedingt wäre.

683 In dem die Elektroden verbindenden Rohr ändern sich bei Einschaltung von Widerständen, wo die Entladung die normale ist, bei Ausschaltung derselben und endlich auch bei Einschaltung von Funkenstrecken (0 und 10 mm) bei Drucken über dem kritischen Punkt (1 mm) die Erwärmungen kaum, sie sind also nahezu unabhängig von der bei jeder einzelnen Entladung durchgegangenen Elektricitätsmenge und nur proportional der gesammten durchgegangenen Elektricitätsmenge.

[1] Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 758 u. ff., 1883*.

Die Erwärmungen sind ferner bei der Ableitung der einen oder anderen Elektrode unabhängig von der Richtung des Stromes, obgleich

Fig. 215.

die Zahl der Entladungen sich dabei ändert. Sie sind auch bei Anwendung von spitzen (*b*, *c*) und kugelförmigen (*a*, *d*) Elektroden bei Anwendung des Apparates, Fig. 215, nahezu unabhängig von der Gestalt derselben.

684 Besteht ein Rohr aus zwei verschieden weiten Theilen, so ist in denselben auch bei Einschaltung von Funkenstrecken die Erwärmung nicht sehr verschieden von der ohne Funkenstrecken und dementsprechend sind bei höheren Drucken die Erwärmungen in beiden Theilen des Rohres nicht sehr ungleich. — Dasselbe gilt auch bei Einschaltung grosser Widerstände.

Bei niederen Drucken ändern sich diese Verhältnisse; dann ist bei Einschaltung von Funkenstrecken die Erwärmung in jedem einzelnen Rohre viel grösser und in den weiteren Röhren die Erwärmung viel kleiner, als in den engeren.

Bei Zusammenfügung eines sehr (4 mm) weiten und eines sehr (0,5 mm) engen Rohres, waren, je nachdem die weitere (*A*) oder engere (*B*) Röhre mit der Maschine verbunden, die andere abgeleitet war, und die Ladung durch positive oder negative Elektricität erfolgte, die Erwärmungen u. A. die folgenden, wobei *F* die Länge der eingeschalteten Funkenstrecke, *x* einen sehr kleinen Druck, *d*, *zd*, *h*, *mh* bezeichnen, dass das weite Rohr dunkel, ziemlich dunkel, hell oder von mittlerer Helligkeit war.

A.					B.				
p	F		Erwärmung eng	Erwärmung weit	p	F		Erwärmung eng	Erwärmung weit
x	+	0	0,20	0,07	x	+	0	0,19	0,09
"	—	0	0,17	0,09	"	—	0	0,18	0,09
"	+	5	0,23	0,18	"	+	5	0,30	0,13
"	—	5	0,18	0,09	"	—	5	0,20	0,10
"	+	10	0,39	0,26	"	+	10	0,49	0,16
"	—	10	0;27	0,13	"	—	10	0,21	0,11
3,8	+	0	1,15	0,38 *z d*	4	+	0	1,12	0,25 *d*
"	—	0	1,35	0,85 *h*	"	—	0	1,36	1,08 *h*
"	+	1	0,95	0,29 *d*	"	+	5	1,22	0,57 *h*
"	—	1	1,23	0,91 *h*	"	—	5	1,50	0,80 *h*
"	+	8	1,11	0,66 *d*	5,3	+	0	1,35	0,20 *d*
"	—	8	1,03	0,83 *h*	"	—	0	1,62	1,20 *h*
7,3	+	0	1,72	0,73 *d*	"	+	4	1,53	0,41 *m h*
"	—	0	2,25	1,33 *h*	"	—	4	1,76	1,14 *h*
"	+	5	1,85	0,63 *d*	"	—	—	—	—
"	—	5	1,90	1,25 *h*	"	—	—	—	—

Danach ist wieder mit oder ohne Funkenstrecken bei hohen Drucken die Erwärmung in den engen Röhren nahezu gleich, namentlich bei durchströmender negativer Elektricität. Im weiten Rohre treten grössere Abweichungen ein; bei wachsender Funkenstrecke steigt die Erwärmung sehr bedeutend (namentlich bei Umgebung des Rohres mit Quecksilber, wo Bindungen der freien Elektricitäten erfolgen), wenn von der Maschine positive Elektricität dem Rohre zugeführt wird. — Dies rührt daher, dass in den weiten Röhren bei der Einschaltung von Funkenstrecken die Entladung mehr und mehr sich von dem „normalen" Verhalten entfernt, bei den engen letzteres ohnehin schon durch die auf ihren Wänden aufgehäuften, sehr stark wirkenden Elektricitäten in hohem Grade aufgehoben ist [1]).

685 Um absolute Bestimmungen über die bei der Entladung in der Längeneinheit der Röhren erzeugten Wärmemengen X_+ und X_- zu gewinnen [2]), wurde ein in eine Entladungsröhre eingeschaltetes Capillarrohr von 0,58 mm Weite auf $l = 9,4$ cm Länge mit einem mit Wasser

---

[1]) Vergl. Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **20**, p. 758, 1883*. — [2]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **10**, p. 229, 1880*.

gefüllten Glasrohr umgeben. Der Wasserwerth H dieses Theiles betrug 16,2 g. Bei einem Ausschlag von 100 Scalentheilen waren die Temperaturerhöhungen t_+ und t_-, je nachdem die isolirte Elektrode der Röhre mit dem positiven und negativen Pol der Maschine verbunden war, die Zahl z der Entladungen in der Minute, sowie die Maximaltemperaturen des Gases T_+ und T_- die folgenden:

p	z	t_+	t_-	X_+	X_-	T_+	T_-
15,5	60 000	1,09	1,01	3200	2966	1977	1830
5,5	144 000	0,50	0,37	2636	1962	1148	849,2

Durch Messung der Ablenkung des Galvanometers vermittelst eines Thermostromes von bekannter elektromotorischer Kraft ergab sich, dass der Ausschlag von 100 Scalentheilen einem Strom von $5866 \cdot 10^{-7}$ Daniell-Siemens entspricht. Ist die entwickelte Wärmemenge der durchgehenden Elektricitätsmenge e proportional, so ist die durch die Elektricitätsmenge Eins in der Zeit Eins auf der Länge Eins erzeugte Wärmemenge $X = Ht/le$. Danach sind die Werthe X in obiger Tabelle berechnet. Die auf der Längeneinheit (1 cm) der Röhren erzeugten Wärmemengen sind also sehr gross, etwa 20 mal grösser als die in dem Schliessungskreise eines Daniell'schen Elementes bei Auflösung von 22,7 mg Zink erzeugte Wärmemenge (160).

Ist T die Maximaltemperatur des Gases, c seine specifische Wärme bei constantem Druck (da es sich aus dem Capillarrohr in die weiteren Theile des Entladungsrohres ausdehnen kann), s das specifische Gewicht bei 760 mm, V das Volumen der Längeneinheit des Rohres, so ist

$$Ht = Tcs \cdot p \cdot V \cdot z / 760.$$

Daraus berechnen sich die Werthe T in obiger Tabelle. Also ist hier die Temperaturerhöhung in einem engen Rohr relativ gering; so dass sie in einem 10 mal weiteren unter 100° sinken würde.

Bereits früher hat dementsprechend Eilhard Wiedemann[1]) experimentell gezeigt, dass in einem Entladungsrohr ein Gas beim Durchgang der Elektricität bereits weit unter 100° leuchten kann. 686

Die ersten Versuche wurden an einem Entladungsrohr angestellt, welches aus einem 30 mm weiten, 90 mm langen, an beiden Seiten conisch ausgezogenen Theile bestand, an das einerseits eine mit einem Glashahn versehene Glaskugel mit einer Aluminiumelektrode, andererseits ein U förmiges Capillarrohr von 0,854 mm Durchmesser angelöthet war, welches wieder in einer Glaskugel mit einer Aluminiumelektrode endete. Das Capillarrohr befand sich in einem Messingrohre voll Terpentinöl, welches ein Thermometer enthielt und von einem doppelwandigen, mit

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 6, p. 298, 1879*.

Wasser gefüllten Blechgefäss umgeben war. Nach dem Evacuiren des mit Luft erfüllten Rohres (auf etwa 3 mm), bis beim Durchleiten der Ströme eines Inductoriums die Schichtung verschwunden war, konnte an der Erwärmung des Calorimeters die in der Luftsäule im Capillarrohr erzeugte Wärmemenge resp. Temperaturerhöhung bestimmt werden.

Wurde nach der Formel des §. 685 die Temperaturerhöhung T des engen Rohres bestimmt, und daraus die Erwärmung τ im weiten Rohre, dessen Querschnitt 1232 mal grösser, als der des Capillarrohres war, nach der Formel $\tau = T/1232$, berechnet, so ergab sich z. B.

p	z	Z	t	T	τ
3,3	350	9	3,93	84 340	68,0
3,3	342	8	3,24	80 130	65,2
3,3	348	8	3,52	85 560	69,5
2,66	348	10	3,51	86 660	70,4
2,66	338	14	4,35	77 250	62,0

Z bezeichnet hier die Zeit des Durchganges des Stromes durch das Rohr in Minuten.

Das Gas leuchtet also im weiteren Rohre bei einem Temperaturüberschuss von nur 65 bis 70° über die Umgebung, d. h. bei 85 bis 90°. In dem engeren Theile des Entladungsrohres ist dagegen die Temperatur sehr hoch.

Da das Rohr zwischen je zwei Entladungen absolut dunkel wird, kann sich nicht die Temperatur durch Addition der Erwärmungen bei den einzelnen Entladungen gesteigert haben.

Auch war der weite Theil des Rohres völlig von der Entladung erfüllt, so dass nicht nur einzelne Theile des Gases darin durch dieselbe erwärmt wurden.

Da auch noch weitere Röhren sich ebenso verhalten, können demnach die Gase bei noch viel geringeren Temperaturerhöhungen leuchten.

Dieses Resultat ist auch von Hasselberg[1]) bestätigt worden.

687 Durch Messung der in einem Spectralrohre unter verschiedenen Bedingungen erzeugten Wärmemengen hat ferner Eilh. Wiedemann[2]) die Wärmemenge A bestimmt, welche zur Umwandlung des Bandenspectrums des Wasserstoffs in das Linienspectrum erforderlich ist. Das horizontale Capillarrohr eines Entladungsrohres wurde in ein Calorimeter gelegt, in den Schliessungskreis ein Funkenmikrometer eingeschaltet und die Wärmemenge und die Zahl der Entladungen bei der Funkenstrecke beobachtet, bei welcher gerade das Bandenspectrum verschwunden ist und das Linienspectrum allein übrig bleibt.

---

1) Hasselberg, Mém. de St. Petersb. 27, 1879*; Beibl. 4, p. 132*. — 2) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 231, 1880*.

Ist t die Temperaturerhöhung des Calorimeters in der Minute beim Drucke p und z die Zahl der Entladungen in der Minute bei dem Ausschlag des Galvanometers 100, ist H der Wasserwerth des Calorimeters, so ist, wenn die Wärmemenge dem Druck proportional ist,

$$A = \frac{tH}{z.60.p}.$$

Bei verschiedenen Drucken 0,9 — 15,3 mm und Radien der Röhren (0,304 und 0,183 mm) sind die Wärmemengen, welche erforderlich sind, um ein Gramm Wasserstoff von der gewöhnlichen Temperatur so stark zu erwärmen, dass das Bandenspectrum in das Linienspectrum übergeht, gleich 128 300 Calorien, unabhängig vom Druck und dem Querschnitt der Röhren.

Dabei geht durch jeden Querschnitt einer Röhre von 1 qmm Querschnitt die Elektricitätsmenge $1015 . 10^{-8}$ Daniell-Siemens ($1173 . 10^{-8}$ Coulomb).

Nimmt man an, dass die Umwandlung des Bandenspectrums in ein Linienspectrum auf dem Zerfallen der Gasmolecüle in ihre einzelnen Atome beruht, so giebt die obige Wärmemenge auch die totale Wärmemenge an, welche einem Gase von gewöhnlicher Temperatur zugeführt werden muss, um diese Dissociation zu bewirken.

688

Entsprechend dem geringen Potentialabfall im dunklen Raume zwischen der positiven und negativen Entladung ist die Temperatur daselbst bei höherem Druck niedriger, als die der leuchtenden Stellen der Entladung. Dies hat de la Rive gezeigt[1]).

In eine Röhre von 16 cm Länge und 4 cm Durchmesser wurden in einem Abstande von 1 cm von den Elektroden Thermometer eingeschmolzen (wobei die Strahlung von den sehr grossen, kugelförmigen Elektroden von $1/2$ bis 1 cm Durchmesser keinen Einfluss haben soll).

In zwei Minuten stieg das Thermometer in Wasserstoff:

Druck	an der + Elektrode	an der — Elektrode	Differenz
2 mm	von 21 — 27^0	von 21 — 25^0	2^0
5	20 — $28\frac{1}{2}$	20 — $25\frac{1}{2}$	3
9	21 — 31	20 — $26\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$
20	21 — $28\frac{1}{3}$	21 — 26	$2\frac{1}{2}$

in Stickstoff:

1) De la Rive, Compt. rend. 56, p. 669, 1863*; Ann. de Chim. et Phys. [4] 8, p. 455, 1866*; Pogg. Ann. 131, p. 577*.

Druck	an der + Elektrode	an der — Elektrode	Differenz
2 mm	von 19 — 24	von 19 — 22	2
5	20 — 29	20 — 24	5
9	20 — 31	20 — 27	4
20	20 — 25½	20 — 25	½

Der Temperaturunterschied ist also auch von der Natur und Dichtigkeit der Gase abhängig.

689 Ueber die Temperatur der einzelnen Stellen der Entladung bei sehr niederen Drucken hat Eilh. Wiedemann,[1]) ausführliche Versuche angestellt, bei denen er die Temperaturen der 18 bis 25 mm weiten Entladungsröhren durch ein angelegtes Thermoelement bestimmte. Danach steigt die Wärmeerzeugung von der positiven Elektrode an erst ganz langsam, dann schnell und erreicht innerhalb der Glimmlichtstrahlen ein Maximum. Von da aus nimmt sie bis zu einem relativen Minimum innerhalb des dunklen Kathodenraumes ab, wo die Erwärmungen indess immer noch viel höher sind, als im positiven Licht. An der Kathode selbst ist die Wärmeerzeugung sehr bedeutend. So war z. B. in einem 25 mm weiten, sehr dünnwandigen Rohre mit kreisförmigen Platten bei verschiedenen Abständen E von der Kathode die Ueberschüsse der Erwärmungen über die Erwärmung an einer Stelle des positiven Lichtes:

E	0	13	32	42	60	90	122	160	210 (g)	250	290 mm
A	27	20	17	17	22	23	22	18	9	3	0

Die Grenze (g) des positiven Lichtes liegt bei $E = 220$. Der dunkle Kathodenraum hatte eine Länge von 37 mm; seine Mitte lag etwa bei $E = 32$ bis 42.

In dem dunklen Raume zwischen dem positiven und negativen Lichte zeigten sich bei den verwendeten sehr niedrigen Drucken, wo derselbe ohnehin nicht scharf ausgebildet ist, soweit sich constatiren liess, keine Besonderheiten.

Diese Resultate wurden bestätigt, indem bei dem §. 543 beschriebenen Apparat die schwimmende Elektrode durch ein mit seiner Quecksilbersäule nach unten gerichtetes Thermometer mit einem 5 mm hohen und 17 mm breiten flachcylindrischen Gefäss ersetzt wurde, welches oben zum Schutz gegen die Kathodenstrahlen an Platindrähten einen kleinen Glimmerschirm trug.

690 Auch Hittorf[2]) hat eine 6 cm weite Röhre aus zwei in einander verschiebbaren, mit einander verkitteten Cylindern hergestellt, in deren

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 771, 1883*. — [2]) Hittorf, Wied. Ann. 21, p. 128, 1884*.

Enden den ganzen Querschnitt erfüllende, hinten mit Glimmerblättern bedeckte, kreisförmige Kupferplatten als Elektroden eingesetzt waren. Durch seitliche Tubuli waren drei möglichst gleiche Thermometer in die Röhre gebracht, (1) dicht an der Kathode, (2) in der äussersten hellen Schicht des Glimmlichts, (3) im positiven Licht. Die Temperaturen der drei Thermometer stiegen beim Durchleiten eines Stromes einer Säule der Reihe nach weniger an; die Unterschiede wuchsen mit der Stromstärke. Wurden die Thermometer (1) und (2) durch Platindrahtsonden ersetzt, so war der Potentialabfall zwischen der Kathode und der Sonde (1) grösser als zwischen den Sonden 1 und 2, obgleich der erstere Abstand 7 mal grösser war, als der zweite.

691 Um die Wärmeentwickelung an den Elektroden und den sie umgebenden Räumen zu untersuchen, haben Naccari und Bellati bei ihren §. 678 beschriebenen Versuchen die Entladungsröhre vertical gestellt und ihren oberen Theil mit einem dünnen, unten angekitteten, mit Quecksilber gefüllten Glasrohr als Calorimeter umgeben, welches bis etwa 30 mm unter das obere Ende des Rohres ging. Die Elektrode daselbst war 28 mm lang, so dass sie ganz von dem Glasrohre umgeben war. Ein Metallschirm schützte dasselbe vor äusserer Strahlung. Auch hier zeigte sich eine annähernde Proportionalität der Wärmeentwickelung W an der negativen Elektrode mit der durchgehenden Elektricitätsmenge I; wobei dieselbe etwa 8 mal mehr Wärme abgab als die positive. Die Wärmeerzeugung an letzterer war so klein, dass die Proportionalität sich nicht deutlich feststellen liess.

Bei anderen Versuchen umgab das Calorimeter den unteren Theil des Rohres, wobei sich eine geringe Zunahme des Verhältnisses W/I (158:160) mit der Stromintensität (31,1:163,5) an der negativen Elektrode zeigte. Die positive Elektrode gab eine etwa 22,8 mal kleinere Wärmemenge. Wurde die Geissler'sche Röhre gehoben, dass nur das am Glase befindliche Ende der Elektroden in das Calorimeter eintauchte, so war dieses Verhältniss noch grösser (welches aber auch wohl von den Druckverhältnissen abhängt).

War das Rohr mit Chlor gefüllt, so war der Temperaturunterschied der Elektroden grösser als bei Wasserstoff. Um zu untersuchen, ob vielleicht die Verschiedenheit der Temperaturen der Elektroden dem Peltier'schen Phänomen analog ist, wurde versucht, ob stärkere oder schwächere Ströme eine Erkältung der Elektroden erzeugten; ohne dass sich indess entscheidende Resultate ergaben.

692 Nach Eilh. Wiedemann[1]) nimmt die Erwärmung an der positiven Elektrode und in ihrer Umgebung bei abnehmendem Druck stetig und stark ab; nur bei ganz niederen Drucken tritt zuweilen wieder eine

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 202, 1880*.

Zunahme ein. Dagegen nimmt die Erwärmung der negativen Elektrode und deren Umgebung mit abnehmendem Druck erst ab und dann wieder stark zu.

So war z. B. die Wärmeentwickelung an einer spitzen Elektrode, je nachdem dieselbe mit der Maschine verbunden (*a*) oder abgeleitet war (*b*):

a			*b*		
p	+	−	*p*	+	−
26,5	0,63	0,60	26	0,62	0,50
8,1	0,26	0,39	8	0,24	0,30
2,6	0,15	0,37	2,4	0,14	0,41
0,6	0,06	0,64	0,8	0,10	0,81
0,2	0,07	0,63	sehr klein	0,10	1,05
sehr klein	0,09	0,77	—	—	—

Bei Einschaltung von Funkenstrecken waren die Resultate unregelmässig.

693 Die Kathodenstrahlen können sehr hohe Temperaturen erzeugen. Lässt man sie von einer concaven Aluminiumkathode in einer grossen Glaskugel gegen einen Brennpunkt convergiren und bringt einen Platinstreifen in demselben an, so erglüht er lebhaft und kann sogar schmelzen. Platiniridiumdraht wird weissglühend [1]). Auch Glas kann daselbst schmelzen [2]).

Dabei tönt zuweilen die Röhre, wenn die Halbkugel als negative Elektrode dient; ist sie positiv, so hört man nur ein schwaches Geräusch. Die Tonhöhe ist unabhängig von der Art der Unterbrechung. Dieses Tönen rührt wohl von den regelmässigen Temperaturschwankungen des im Focus befindlichen Platinblechs her [3]).

Werden die gegen einen Brennpunkt convergirenden Strahlen durch einen Magnet seitlich abgelenkt, so dass sie auf die Glaswand fallen, so hört bald die Phosphorescenz der letzteren daselbst auf, die Röhre wird heiss und erhält dauernd einen braunen Fleck, der zum Theil von Ablagerungen des Metalls der Kathode herrührt und unter dem Mikroskop kleine Blasen zeigt. Bei längerer Dauer springt zuletzt die Röhre oder sie schmilzt und wird vom Luftdruck durchbrochen.

Wird eine Glasplatte in der Röhre in dem Brennpunkt befestigt, so zeigt das Rohr bald die Spectrallinien des Wasserstoffs, welches Gas aus dem Glase, wohl in Folge eines Wassergehaltes, frei wird.

---

[1]) Crookes, Phil. Trans. 1879, **2**, p. 162, 658*. — [2]) Cunnington, Nature, **19**, p. 410*; Crookes, ibid., p. 458, auch l. c.; Beibl. **3**, p. 526*. — [3]) Cross, Amer. J. of Otolog., Jan. 1881*; Beibl. **5**, p. 546*.

694 Diese Erwärmung vermag indirect Körper zum Phosphoresciren zu bringen. So führt Puluj [1]) in eine Glaskugel ein etwa 4 cm langes und 3 cm breites Glimmerblättchen ein, Fig. 216, und zu beiden Seiten desselben eine Elektrode in Form einer Kugelcalotte und eine andere ebene. Das Glimmerblatt ist auf der letzterer zugewendeten Seite mit Kreide überzogen. Dient die ebene Elektrode als Kathode, am besten nur bei einem Schluss des den Strom liefernden Inductoriums, so phosphorescirt die Kreide direct durch die Kathodenstrahlen lebhaft orangefarben. Nach Unterbrechung des Stromes verschwindet die Phosphorescenz allmählich. Dient dann die schalenförmige Elektrode als Kathode (etwa 50 bis 60 Sec. lang), so wird das Glimmerblatt in der Mitte stark erhitzt und dadurch phosphorescirt die Kreide daselbst. Wenn sich die Wärme ausbreitet, so verschwindet die Phosphorescenz in der Mitte und rings herum entsteht ein leuchtender Ring. Wird der Strom unterbrochen, so erscheint bei wiederholter Schliessung die Phosphorescenz nicht wieder, wohl aber nach erneuter directer Bestrahlung der Kreide. Die Erwärmung regt also die verschwindende Phosphorescenz für einige Zeit von Neuem an, wie die durch Insolation erzeugte; allmählich erlischt sie aber.

Fig. 216.

7. Mechanische Wirkungen bei Gasentladungen.

695 Man hat mehrfach Versuche angestellt, mechanische Wirkungen der Entladungen hervorzurufen, welche namentlich nachweisen sollten, dass durch dieselben Theile der Elektroden oder das zwischen ihnen befindliche Gas in der einen oder anderen Richtung fortbewegt würden.

Zunächst führen die Entladungen Theilchen der negativen Elektrode mit sich fort. Bei fortgesetztem Durchleiten eines Stromes durch ein Entladungsrohr mit Metallelektroden bedeckt sich bald die die negative Elektrode umgebende Wand der Röhre, da wo sie das Glimmlicht

---

[1]) Puluj, Strahlende Elektrodenmaterie, Wien. Ber. 2, p. 18, 1883*.

trifft, mit einem metallischen Anflug, während die Elektrode selbst rauh und corrodirt erscheint. Die Farbe des Anfluges entspricht ganz der des fein vertheilten Metalles der Elektrode; er ist bläulich bei einer Silberelektrode, grünlich bei Gold, schwärzlich bei Platin [1]). — Man kann das Beschlagen des Rohres verhindern, wenn man über die Elektrode im Innern desselben ein vorn offenes Glasröhrchen löthet, dessen Durchmesser etwas grösser ist als der der Elektrode, und welches ein wenig über das Ende derselben hinüberragt.

Eine negative Elektrode von Aluminium wird verhältnissmässig wenig corrodirt, wohl wegen der geringeren Flüchtigkeit. Verbindet man indess eine Säule von 1000 Chromsäureelementen mit den Elektroden eines cylindrischen Entladungsgefässes voll Wasserstoff von 3 mm Druck, dessen Kathode ein 3 mm dicker Aluminiumdraht ist, so bedeckt sich dieselbe mit meergrünem Licht und ein dicker grauer Spiegel erscheint auf dem Glase [2]).

Wird Platinschwarz in einer Entladungsröhre auf die negative Elektrode gebracht, so wird es durch den Schlag eines starken Inductoriums zur positiven Elektrode getrieben. An letzterer bleibt es liegen. Aehnlich verhalten sich Graphit, Lampenschwarz und feines Stahlpulver. Nicht leitende Pulver, Sand und Lycopodium werden nicht beeinflusst [3]).

696 Zur Herstellung der erwähnten Metallüberzüge verwendet man nach Wright [4]) zweckmässig 15 cm lange, 4 bis 6 mm weite Glasröhren, die in der Mitte einen seitlichen, zur Verbindung mit der Pumpe bestimmten Ansatz haben. An die Enden der Röhren sind etwa 3 cm lange, dünne Glasröhren angesetzt, aus denen die Metalle in Form von etwa $^1/_3$ mm dicken und 4 cm langen Drähten hervorragen. An ihren hinteren, in den Ansatzröhren befindlichen Enden sind sie mit Platinelektroden in Verbindung. Sind die Metalle pulverförmig, so zieht man eine oberhalb abgesprengte Glasröhre aus, so dass sie einen Trog bildet, in den man die Pulver hineinbringt. Die Entladungsröhre wird mit einem Gase gefüllt, welches das Metall nicht angreift. Ein möglichst gleichförmiger Strom befördert die Gleichmässigkeit des Absatzes, der sich meist nur wenig weiter, als das Ende der Elektrode, erstreckt. Bei Anwendung einer Influenzmaschine bedarf es der Einfügung eines Condensators, um die bei jeder einzelnen Entladung durchgehende Elektricitätsmenge zu vergrössern und dadurch die mechanische Wirkung zu steigern. — Auf diese Weise wurden Ueberzüge erhalten von Gold, Silber, Kupfer, Wismuth, Platin, Palladium, Blei, Zink, Cadmium, auch Aluminium und Magnesium (mit stärkeren Strömen); Zinn, Eisen, Nickel, Kobalt (wobei die oxydirende Wirkung von Spuren von Sauerstoff kaum zu vermeiden ist), Tellur, Magneteisenstein. —

---

[1]) Gassiot, Phil. Trans. 1858, pt. 1, p. 1*; Plücker, Pogg. Ann. **103**, p. 90, 1858*. — [2]) Hittorf, Wied. Ann. **21**, p. 126, 1884*. — [3]) Spottiswoode und Moulton, Phil. Trans. 1880, **2**, p. 582*. — [4]) A. W. Wright, Sillim. J. (3) **13**, p. 49*; **14**, p. 169, 1877*; Beibl. **1**, p. 203, 690*.

Diese Ueberzüge lassen sich auch leicht auf ebenen Glasplatten darstellen und eignen sich gut zu optischen Untersuchungen.

In ähnlicher Weise stellt Wright auch Hohlspiegel mit Metallbelegungen dar.

697 Bedeckt man die Elektroden mit Erbinerde, so erkennt man die Fortschleuderung derselben, resp. auch eine Reflexion an den Wänden, an den hell leuchtenden Spectrallinien derselben[1]).

698 Der negative Metallanflug bildet sich an denselben Stellen, an welchen auch das Glas der Röhre fluorescirt; er wird nach Wächter[2]) bei um so höherem Druck erhalten, je geringer der Abstand der Elektrode von der Glaswand ist (Abstand 30 bis 0,04 mm, Druck 0,6 bis 15 mm). Bei Kathoden von Holz, Papier und siedendem Oel bildet sich nach demselben (l. c.) kein Anflug.

Führt man die Elektricität den Elektroden durch ein Inductorium direct zu, so erhält man den Anflug, ebenso wie die Phosphorescenz bei geringeren Drucken, als wenn man die Stromesbahn durch eine Funkenstrecke unterbricht, wohl weil im letzteren Falle die Elektricität zu den Elektroden plötzlich in viel grösserer Dichtigkeit gelangt, als zur normalen Entladung erforderlich ist, und nunmehr das Glimmlicht u. s. f. sich nicht mehr ordentlich ausbildet.

699 Lässt man die von einer Platinplatte kommenden Kathodenstrahlen durch einen Glimmerschirm mit einem Loch in der Mitte auf eine Glasplatte fallen, so beobachtet man indess an der grünfluorescirenden Stelle keine Ablagerung von Platin, selbst wenn die die Elektrode selbst umgebenden Stellen der Glasröhre von Platin ganz schwarz gefärbt sind (Crookes). Jedenfalls bestehen also die Kathodenstrahlen, wie übrigens auch ihr Spectrum zeigt, nicht aus fortgerissenen Theilchen der Elektrode.

Der Unterschied dieser Versuche von dem im vorigen Paragraphen beschriebenen kann davon herrühren, dass von der Mitte der plattenförmigen Elektrode die Entladung nicht in so grosser Dichtigkeit ausgeht, dass Theilchen mitgerissen werden, wohl aber von ihren Rändern.

700 Die Ausbreitung des Beschlages entspricht auch durchaus nicht der Ausbreitung der Kathodenstrahlen. So löthete Eilh. Wiedemann[3]) an das eine Ende einer Entladungsröhre in axialer Richtung ein Glasrohr und kittete in letzteres ein etwas engeres, mit Chlor- oder Jodblei voll gestopftes Rohr, in welches eine nach aussen führende Alumi-

---

[1]) Crookes, Chem. News, 43, p. 237, 1881*; Beibl. 5, p. 511*. — [2]) Wächter, Wien. Ber. 85, p. 560, 1882*; Wied. Ann. 17, p. 909*. — [3]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 795, 1883*.

niumelektrode eingesetzt war. Die Kathodenstrahlen durchflossen die Entladungsröhre fast genau axial. Das Chlor- und Jodblei setzte sich aber an den Wänden, namentlich innerhalb des die Kathode umgebenden dunklen Raumes ab. — Dasselbe folgt auch schon aus meinem §. 570 beschriebenen Versuche, wonach beim Erwärmen der mit einer Glaskuppe bedeckten Kathode eines Entladungsrohrs das an derselben auftretende Natriumlicht sich nicht weiter ausbreitet. — Goldstein[1]) hat später diesen Versuch mit demselben Erfolge wiederholt, indem er die Kathode durch eine Natriumplatte ersetzte. Die Dicke der gelben Schicht um dieselbe betrug höchstens $^1/_{20}$ der Länge der Kathodenstrahlen.

701 An den Kathodenstrahlen hat Crookes[2]) direct mechanische Wirkungen nachzuweisen gesucht.

Wird in die Mitte eines eiförmigen Gefässes, Fig. 217, an dessen beiden Enden kleine Platten *a* und *b* als Elektroden angebracht sind, an Glasfäden ein 8 mm grosses, zwischen zwei Glasspitzen laufendes Radiometerrad mit Glimmerflügeln eingehängt und vor der einen Hälfte desselben ein drehbarer Aluminiumschirm *e* angebracht, so dreht sich, wenn die hinter demselben befindliche Elektrode negativ ist, also nur die eine

Fig. 217.

Hälfte des Radiometerflügels von den Kathodenstrahlen getroffen wird, das Rad im Sinne der Richtung der Kathodenstrahlen. Wird der Aluminiumschirm durch Drehen der Röhre entfernt, so rotirt das Rad nicht.

[1]) Goldstein, Elektr. Abstossung, p. 189, Berlin 1880*. — [2]) Crookes, Phil. Trans. 1879, pt. 2, p. 135, 641*.

Eine Abänderung dieses Versuchs ist in Fig. 218 gezeichnet. Auf zwei Glasstäben rollt in einer Entladungsröhre ein kleines Schaufelrad aus Glimmer, dessen obere Hälfte in der Bahn der Entladung liegt, welche zwischen den in die oberen Theile der Röhre eingeschmolzenen Elek-

Fig. 218.

troden übergeht. Wird das Rad daselbst von den Kathodenstrahlen getroffen, so rollt es gegen die positive Elektrode hin.

702 Auch kann man unter den schräg gestellten Aluminiumflügeln eines Radiometers einen Drahtring anbringen, welcher mit der negativen Elektrode eines Inductoriums verbunden ist, und erstere durch die sie tragende Spitze mit der positiven Elektrode verbinden. Treffen die Kathodenstrahlen die Flügel, so rotiren sie. Bedeckt man sie dabei mit einer fluorescirenden Substanz, so leuchten sie noch dazu [1]).

703 Eine weitere Abänderung dieses Versuches ist von Puluj [2]) angegeben. In der Ebene der verticalen Flügel eines Radiometers werden excentrisch cylinderförmige Kathoden mit ihren Cylinderaxen vertical in die Glashülle eingeschmolzen. Werden die Flügel von den Kathodenstrahlen getroffen, so rotiren sie rückwärts in der Richtung der auftreffenden Strahlen. Sind die excentrisch gestellten Kathoden drahtförmig, so rotiren die Flügel bei 1 mm Druck in entgegengesetzter Richtung wie die der aus den Enden austretenden Kathodenstrahlen [3]), da nach Puluj (l. c.) die Ausstrahlung gegen die Flügel wesentlich von den Seitenflächen der Drahtkathoden ausgeht. Bei sehr hoher Verdünnung (0,01 mm Druck) kehrt die Rotation sich um, da dann die Strahlen nur noch vom Ende des Drahtes ausgehen.

704 Indess sind diese Versuche kein Beweis für eine directe mechanische Wirkung der Kathodenstrahlen, resp. der vermeintlich von ihnen mit-

---

1) Puluj, Wien. Ber. [2] 85, p. 871, 1882*. — 2) Puluj, Strahlende Elektrodenmaterie, Wien, Gerold 1883, p. 38*. — 3) Zöllner, Pogg. Ann. 160, p. 464, 1877*.

genommenen Kathodenmaterie (Puluj), da die von ihnen getroffenen Flügel erwärmt werden und in ganz secundärer Weise, wie in einem gewöhnlichen Radiometer, in Rotation kommen.

705 Aehnlich verhält es sich mit dem folgenden Versuch.

Verbindet man die Nadelspitze, auf der das aus Aluminium hergestellte Flügelrad eines Radiometers ruht, mittelst eines in den Glasträger der Spitze eingeschmolzenen Drahtes mit der negativen Elektrode eines Inductoriums, während die positive ein oben in das Radiometer eingeschmolzener Draht ist, und sind die Aluminiumflügel auf einer Seite mit Glimmer bedeckt, so dreht sich bei einem Druck von 0,2 mm das Rädchen ein- bis zweimal mit dem Aluminium vorwärts, bleibt stehen und kehrt dann um. Bei weiterer Evacuirung nimmt die Zahl der Drehungen nach der Aluminiumseite zu und ebenso die Geschwindigkeit der Drehung nach der Umkehrung. Ist der Druck 0,04 mm, so rotirt das Rädchen nur nach der Aluminiumseite, und die Umkehr findet erst nach der Unterbrechung des Stromes statt [1]).

Auch bei diesen Versuchen ist die Rotation secundär verursacht durch die ungleiche Temperaturerhöhung der beiden Seiten der Flügel, welche theils in Folge der an ihnen entstehenden Entladungen, theils durch die Strahlung der namentlich bei stärkerer Verdünnung von den Kathodenstrahlen getroffenen Glaswand an beiden Seiten ungleich stark erwärmt werden oder ungleich stark die in ihnen erzeugte Wärme ausstrahlen.

706 Sind die Aluminiumflügel, welche selbst als Elektrode dienen, halbcylindrisch mit ihren Cylinderaxen vertical gestellt, so drehen sie sich bei vollem Atmosphärendruck mit der concaven Seite nach vorn, gleichviel ob sie positiv oder negativ sind (offenbar in Folge der Reaction der von ihren Kanten ausstrahlenden, mit Transport von Materie verbundenen Büschel). Wird das Glasgefäss mit der Hand umspannt, so kehrt sich die Rotation um. — Bei 620 mm Druck wendet sich die Rotationsrichtung um, die Flügel gehen mit der convexen Seite voran. Die Rotation wächst bei abnehmendem Druck (bis 390 mm), nimmt dann ab und hört bei 140 mm Druck auf. Sie ist etwas schneller, wenn das Flügelpaar als Kathode dient. Bei 0,5 mm Druck dreht sich wieder, wenn die Flügel als Kathode dienen, das Rädchen mit der concaven Seite vorwärts. Die Geschwindigkeit wächst bis zu 0,04 mm Druck und wird bei abnehmendem Druck wieder langsamer. Wird dann der Strom unterbrochen, so dreht sich das Rad eine Zeit lang in demselben Sinne viel schneller. Bei 0,01 mm Druck kehrt sich die Rotationsrichtung wieder um, die Flügel gehen mit der convexen Seite voran [2]).

---

[1]) Bereits von Crookes mit einerseits berussten Aluminiumflügeln (Phil. Trans. 1879, 1, p. 140*), vollständiger von Puluj (Strahlende Elektrodenmaterie, Wien 1883, p. 42*) beobachtet. — [2]) Puluj, l. c.

Auch hier können nach meiner Meinung die secundären Erscheinungen alle Verhältnisse erklären. Bei den höheren Drucken treten in Folge der Büschelentladung, welche je nach dem Druck und der Ableitung gegen die andere Elektrode, die Glaswand oder in die Luft hinein stattfinden kann, Reactionserscheinungen ein. Bei niederen Drucken bildet sich das Glimmlicht aus und wird die Elektrode, resp. bei noch niederen Drucken, wo dasselbe bis zu den Gefässwandungen vorschreitet, die Glaswand erwärmt, wodurch in Folge der thermischen Verhältnisse, wie bei jedem Radiometer, Rotationen auftreten können.

Ein weiteres Eingehen in diese relativ complicirten Verhältnisse würde die principiellen Fragen doch kaum klären können.

707 Wir haben schon erwähnt, dass auch die von den abgeleiteten Stellen der Glaswand eines Entladungsapparates ausgehenden Kathodenstrahlen ganz analoge mechanische Wirkungen ausüben können, wie die directen Kathodenstrahlen.

Befinden sich sehr dünne Glasblättchen in einem Rohr, durch welches unter Einschaltung einer längeren Funkenstrecke der Strom einer Influenzmaschine hindurchgeht, und erregt man durch Berührung einer Stelle des Rohres mit dem Finger daselbst Kathodenstrahlen dicht unter einem Blättchen, so wird es stark bewegt, während es, wenn es ferner liegt, in Ruhe bleibt [1]).

Sehr deutlich zeigt sich diese Wirkung auch bei dem folgenden Versuche: Wenn man in ein gerades Rohr von 18 cm Länge und 4 cm Weite einerseits eine gerade, andererseits eine ⅃ förmige, von einer sie überragenden Glasröhre umgebene Aluminiumelektrode einsetzt und in der Mitte des Rohres ein Radiometerkreuz anbringt, so geräth es in Rotation, wenn die gerade Elektrode als Kathode dient, nicht aber, wenn die gebogene, da im letzteren Falle die Kathodenstrahlen das Radiometer nicht treffen. Wird aber die Glaswand nahe dem Radiometer berührt, wodurch daselbst eine secundäre negative Elektrode entsteht, so wird, je nachdem die von dieser Stelle sich normal fortpflanzenden Strahlen das Radiometer treffen, dasselbe im einen oder anderen Sinne in Rotation versetzt [2]).

708 Zwischen den Bedingungen, welchen die Empfindlichkeit (§. 663 u. f.) und die mechanisch-thermischen Wirkungen der Entladungen unterliegen, besteht ein wesentlicher Unterschied. Ein Radiometer, dessen Flügel als negative Elektroden dienen, rotirt ebenso wohl unter Einfluss der gewöhnlichen, schnell auf einander folgenden Entladungen einer Influenzmaschine, wie auch, wenn in den Kreis eine Funkenstrecke eingeschaltet wird, während die Ablenkung der Entladung durch einen der Röhre seitlich genäherten Leiter in letzterem Falle grösser ist [3]).

---

[1]) Spottiswoode u. Moulton, l. c., §. 663. — [2]) Domalip, Sitzungsber. d. k. Böhm. Akad., 2. Juli, 1880*. — [3]) Spottiswoode und Moulton l. c.

709 Man hat auch nachzuweisen versucht, dass das Gas in einer Entladungsröhre in der Umgebung der negativen Elektrode einen geringeren Druck, als an der positiven hat. So pumpt Bückmann [1]) eine Spectralröhre soweit aus, dass beim Durchgang des Stromes im kürzeren der beiderseits angeschmolzenen, ungleich langen, weiten Theile derselben nur negatives Licht und dunkler Raum zu sehen ist. Der Druck wird so regulirt, dass letzterer möglichst gross wird. Dann wird die Röhre von der Pumpe abgenommen und werden Entladungen nochmals durchgeführt. Noch während des Durchganges des Stromes wird die Röhre ungefähr in der Mitte der engeren Röhre durch Abschmelzen getheilt. Durch Abbrechen der Spitzen unter Quecksilber von 0^0 wird dann in möglichst sorgfältiger Weise der noch vorhandene Druck und das Gasvolumen in beiden Theilen bestimmt.

Die Druckunterschiede an den Elektroden betragen von $^1/_2$ bis 1 mm und sind um so grösser, je grösser der dunkle Raum ist. Man kann also annehmen, dass die Spannung im dunklen Raume selbst geringer ist. Zwei Röhren, welche so eingerichtet waren, dass der negative Theil negative Strahlen und positives Licht zeigte, und dass der dunkle Raum an Grösse abnahm, was bei zunehmender Verdünnung durch Regulirung der Stromstärke zu erreichen war, gaben viel geringere Druckunterschiede.

Somit fand sich die grösste Dichte im positiven Licht, geringere im negativen und die kleinste im dunklen Raume.

Diese Unterschiede können indess auch dadurch secundär bedingt sein, dass während der Entladungen der die Kathode umgebende Theil der Entladungsröhren relativ heisser war, als der um die Anode, der dunkle Raum, oder vielmehr die Grenze desselben an dem Kathodenlicht am heissesten war.

Nach Moulton und Spottiswoode [2]) treten Druckänderungen, welche sie übrigens der Richtung nach veränderlich fanden, bei kleineren Elektroden weniger deutlich hervor, als bei grossen, so dass sie von einem Austreiben von Gas aus der Anode und einer Absorption desselben durch die Kathode oder umgekehrt unter der Einwirkung des Stromes herrühren sollten.

8. Helligkeit und Spectren der Gasentladungen.

710 Die Helligkeit des Lichtes der Entladungsröhren nimmt zu mit der bei jeder Einzelentladung hindurchgeführten Elektricitätsmenge, so also, wenn man die mit der Elektricitätsquelle, dem einen Pol einer anderseits abgeleiteten Holtz'schen Maschine oder eines Inductoriums verbundene Elektrode mit der einen Belegung eines Condensators, einer Leydener

[1]) Bückmann, Ueber elektrische Entladungen in verdünnten Gasen. Inaug.-Diss. Amsterdam 1881; Beibl. 6, p. 256*. — [2]) Moulton und Spottiswoode, Chem. News 45, p. 143, 1882*; Beibl. 6, p. 514*.

Batterie verbindet, deren andere Belegung zur Erde abgeleitet ist. Das Licht nimmt im Allgemeinen ab mit wachsender Verdünnung des Gases.

711 Die Farbe des Lichtes an der positiven Elektrode in den Entladungsröhren ist je nach der Natur des in ihnen enthaltenen Gases verschieden. Sie ist röthlich in Röhren voll Wasserstoffgas, kupferroth bei Stickstoff, rosa bei Sauerstoff, weissgrau bei Kohlensäure und Kohlenoxyd; himmelblau bei schwefliger Säure, hellrosa bei Luft, schön purpurroth in Röhren mit Schwefelsäuredampf, bleich weissgrau in denen mit Quecksilberdampf u. s. f. Die Farbe ändert sich oft scheinbar mit dem Querschnitt des Rohres und an verschiedenen Stellen der Schichten [1]), ohne dass jedoch dabei das Spectrum des Lichtes ein anderes ist. Häufig ändert auch das Licht im Laufe der Versuche seine Farbe in Folge von Zersetzung des Gases. Enthält z. B. das Rohr oder das elektrische Ei verdünnte Luft und Terpentinöldampf, so zeigt es zuerst ein stark geschichtetes, rothes Licht, welches allmählich seine ziemlich grobe Schichtung verliert und bleich und weisslich wird. Vermuthlich verbindet sich hier allmählich der Sauerstoff der Luft mit dem Terpentinöl, so dass nur der Dampf des letzteren das Ei erfüllt. Aehnliche Erscheinungen beobachtet man häufig bei der Untersuchung des Spectrums des elektrischen Lichtes zusammengesetzter Gase.

712 Will man das Spectrum verschiedener gasförmiger Substanzen studiren, so bedient man sich der §. 471 erwähnten Spectralröhren. Sind die Substanzen, deren Licht untersucht werden soll, erst bei höherer Temperatur flüchtig, so giebt man den Röhren die Fig. 219 gezeichnete Gestalt, bringt die Substanz (z. B. Schwefel u. s. f.) hinein, evacuirt die Röhre durch den Ansatz *a*, erhitzt sie sodann, bis alle Reste der Gase ausser dem Dampf der in sie hineingebrachten Substanz entfernt sind, und schmilzt den Ansatz *a* ab. Vor oder während des Hindurchleitens des Stromes durch die Elektroden *b* und *c* erhitzt man den vertical gestellten, capillaren Theil des Rohres durch eine Gas- oder Weingeistflamme [2]).

Fig. 219.

Um bei sehr starken Entladungen den Einfluss der Glaswand zu beseitigen, lässt man dieselben am zweckmässigsten zwischen zweien, in der Axe eines weiteren Rohres einander gegenüberstehenden Kugeln übergehen.

---

[1]) Vergl. §. 556. — [2]) Plücker und Hittorf, Phil. Trans. 1865, p. 2*.

Zur genaueren Untersuchung des Lichtes der Röhren bringt man ihre einzelnen Theile vor den Spalt eines Spectrometers und zerlegt das Licht durch die Prismen des letzteren Apparates. Dabei empfiehlt es sich häufig, das Bild der parallel oder senkrecht zum Spalt gestellten Röhren mittelst einer Linse auf den Spalt zu projiciren. Man muss indess bei diesen Versuchen wegen der bedeutenden Fluorescenz des Glases der Röhren eine gewisse Vorsicht beobachten; ebenso bei sehr starken Entladungen darauf achten, dass das Glas der Röhren corrodirt, seine Bestandtheile verflüchtigt und zum Glühen gebracht werden können, auch von dem Metalle der Elektroden und der auf und in ihnen condensirten Gasschicht, welche ausser dem Gas in den Röhren noch manche andere Bestandtheile enthalten kann, glühende Gas- und Metalltheile in die Entladung übergehen.

Die Betrachtung der einzelnen Spectren der Gase, welche sich bei wechselndem Druck und wechselnder Dichtigkeit der in der Zeiteinheit durch die Röhren gehenden Elektricitäten ändern, gehört nicht hierher, da letztere Aenderungen nicht einem besonderen elektrischen Einfluss, sondern, abgesehen von den eben erwähnten störenden Einflüssen, nur secundär den Temperaturunterschieden zuzuschreiben sind, welche bei den verschieden starken Entladungen auftreten. Ebenso wenig besprechen wir die Aenderungen, welche die Spectra in den Röhren mit der Zeit erfahren, da auch sie nur durch Veränderung der Elektroden und somit erfolgende Aenderung der Entladungsart oder durch Veränderung der Gase in den Röhren bedingt sein können [1]).

713 Wir erwähnen nur einige Punkte, welche für das Wesen der elektrischen Entladungen als solchen von Interesse sein können. Führt man durch Spectralröhren oder besser durch weitere Röhren den Strom der Influenzmaschine mittelst spitzer Elektroden oder den des Inductoriums unter Einschaltung grosser Widerstände, feuchter Schnüre u. dgl. m., so erhält man meist bei Untersuchung der positiven Entladung das Bandenspectrum des Gases in der Röhre. Vermehrt man aber die bei jeder Entladung durch die Gase gehenden Elektricitätsmengen, indem man in den Entladungsapparaten grössere kugelförmige Elektroden anwendet, oder besser noch dieselben mit den Belegungen eines Condensators verbindet, oder auch nur, indem man in den Schliessungskreis zwischen zwei Metallkugeln eine kürzere oder längere Funkenstrecke in der gewöhnlichen Luft einschaltet, resp. ein Inductorium von grosser Capacität benutzt,

---

[1]) Bei sehr alten Röhren wird z. B. der Gasinhalt von den Elektroden allmählich absorbirt (Goldstein, Berl. Monatsber. 4. Mai, 1876, p. 281*), wodurch die Erscheinungen die gleichen werden, wie wenn das Gas in ihnen sehr stark verdünnt würde (Reitlinger u. Kuhn, Pogg. Ann. **141**, p. 131, 1870*). Werden die Röhren erhitzt und dadurch die absorbirten Gase frei gemacht, so zeigen sie beim Durchgang des Stromes zuerst ihr früheres Verhalten, bald aber werden die Gase wieder absorbirt.

so erhält man das aus einzelnen hellen Linien bestehende Linienspectrum der Gase.

Linien, welche dem Metall der Elektroden entsprechen, zeigen die Entladungen nicht, sie werden also bei genügender Luftverdünnung allein durch die Gase bedingt.

714 Als Grund der Umwandlung der Bandenspectra in Linienspectra bei starken Entladungen nimmt man an, dass bei schwachen Entladungen die Aetherhüllen der unveränderten Molecüle in Schwingungen versetzt werden, bei starken aber in Folge der zugeführten Wärme die Molecüle in ihre Atome zerfallen, deren Aetherhüllen nun für sich verschiedene gleichzeitige Schwingungsbewegungen vollführen, welche den hellen Linien entsprechen. Beide Spectra gehen oft neben einander her, wenn noch nicht alle Molecüle in ihre Atome zerlegt sind [1]).

Ueber die zu diesem Zerfallen erforderliche Wärmemenge siehe §. 687.

715 Das negative Glimmlicht zeigt im Allgemeinen das Bandenspectrum der Gase, in welchem eventuell auch einzelne Linien des Linienspectrums und noch mehrere helle Bänder (z. B. im Sauerstoff 4 oder 6) auftreten, welche möglicher Weise von den in der Kathode absorbirten Gasen, auch dem Fluorescenzlicht des Glases herrühren können [2]).

Nach Schuster [3]) ist das Bandenspectrum des Sauerstoffs am negativen Pol ein eigenthümliches, welches er auf Bildung molecularer Verbindungen zurückführt. Kehrt man den Strom um, so erscheint es noch einige Zeit in der positiven Entladung, so dass dieselben ein wenig andauern sollen.

Bei wachsender Verdünnung oder Verstärkung der Entladung geht das Spectrum der positiven Entladung mehr und mehr in das der negativen über [4]).

Dabei verschwinden im Allgemeinen nach einander die weniger brechbaren Strahlen vor den brechbaren, wenn nicht die zu geringe Helligkeit der brechbareren Strahlen scheinbar eine Ausnahme hiervon bedingt. Treten mehrere Spectra in gemischten Gasen auf, so verschwinden sie je nach ihren relativen Intensitäten nach einander [5]).

716 Enthält ein Entladungsrohr Wasserstoff und etwas Quecksilber, so erscheinen nach Eilhard Wiedemann [6]) beim Erhitzen und Ver-

---

[1]) Siehe hierüber die abweichende Ansicht und die früheren Versuche von Wüllner, Pogg. Ann. **147**, p. 321, 1872*; **154**, p. 149, 1875*. — [2]) Vergl. van der Willigen, Pogg. Ann. **106**, p. 610, 1859*; Dove, Pogg. Ann. **104**, p. 184, 1858*; Plücker, Pogg. Ann. **104**, p. 117, 1858*; Reitlinger und Kuhn, Wien. Ber. **61** [2], p. 408, 1870*; Carl's Rep. **6**, p. 296*. — [3]) Schuster, Proc. Roy. Soc. **27**, p. 383, 1878*; Beibl. **2**, p. 493*. — [4]) Goldstein, Berl. Monatsber., 4. Mai 1876, p. 281*. — [5]) v. Waltenhofen, Wien. Ber. **51** [2], p. 535*; Pogg. Ann. **126**, p. 527, 1865*. — [6]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **5**, p. 517, 1878*.

dampfen des letzteren neben den hellen Wasserstofflinien immer heller werdende Quecksilberlinien, wobei allmählich sowohl im weiteren, wie im engeren Theile der Röhren die Wasserstofflinien verschwinden. Ueber 240° erscheinen nur noch die Quecksilberlinien. Beim Erkalten treten die Wasserstofflinien wieder hervor.

An der negativen Elektrode bleiben die Linien des Wasserstoffs länger bestehen, als an der positiven.

Auch Natriumdampf in dem Entladungsrohre macht die Stickstoff- und Wasserstofflinien in gleicher Weise verschwinden; sie zeigen sich ebenfalls nach dem Erkalten wieder. Bei Joddampf verschwinden die Spectren der anderen Gase neben dem des Joddampfes nicht.

Da in vertical, wie in horizontal gestellten Entladungsröhren das Verhalten ganz dasselbe ist, so kann es nicht etwa auf einer Verdrängung der Gase von einzelnen Stellen durch den Quecksilberdampf herrühren. Ebenso wenig können Temperaturverschiedenheiten im Funken selbst wirksam sein, da die Erscheinung bei der Anwendung der verschiedensten Elektricitätsquellen und dem Durchgange verschiedener Elektricitätsmengen auftritt. — Dasselbe hat später auch H. W. Vogel[1]) beobachtet.

Möglicher Weise wird hier der Strom der Elektricität überwiegend in dem Metalldampf fortgeführt und bringt nur ihn zum Leuchten.

9. Magnetisches Verhalten der Gasentladungen.

717 Der durch den luftverdünnten Raum hindurchgehende Entladungsstrom hat ganz dieselben Eigenschaften, wie der Strom in den metallischen und flüssigen Leitern, er vermag z. B. Stahlnadeln zu magnetisiren und Magnete abzulenken u. s. f. — Analog hatte schon früher Savary[2]) nachgewiesen, dass Stahlnadeln, welche sich in gleichem Abstande von Metalldrähten und einer stark evacuirten Glasröhre befinden, die in den Entladungskreis einer Leydener Batterie eingeschaltet sind, durch den Schlag derselben gleich stark magnetisirt werden.

Ueber einer Geissler'schen Röhre ändert sich dagegen an verschiedenen Stellen nach von Liphart[3]) die Magnetisirung der Nadeln trotz gleichen Abstandes so, dass sie vom positiven zum negativen Pol erst abnimmt, dann zunimmt, dann bis zur negativen Elektrode wieder abnimmt. Bei anderen Röhren erfolgt häufigerer Wechsel der Ab- und Zunahme, wo also auch die Stromesrichtung alternirt. Der Grund ist vielleicht der, dass die von einer geladenen Elektrode ausgehenden Ströme nicht ganz durch die Röhre gelangen, sondern nur die Wände laden und sich dann durch die Elektrode rückwärts entladen.

---

1) H. W. Vogel, Monatsber. der Berl. Akad. 1879, p. 586*; Beibl. 4, p. 125*. — 2) Savary, Compt. rend. 7, p. 687, 1828*. — 3) von Liphart, Pogg. Ann. 116 p. 555, 1862*.

718 Die Kathodenstrahlen lenken dagegen eine über ihnen befindliche Magnetnadel nicht ab, wie Hertz[1]) folgendermaassen gezeigt hat.

In einem 300 mm langen, 28 mm weiten Rohre diente eine den Querschnitt erfüllende kreisförmige Messingscheibe als Kathode. In dieselbe war centrisch ein Thermometerrohr eingefügt, welches vorn einen als Anode dienenden conaxialen Draht trug. Wurde der Strom den Elektroden durch um einander gewickelte Drähte zugeführt, so konnte der geschlossene Strom bis zu den Elektroden und zwischen Anode und Kathode eine Magnetnadel, eine 12 mm lange, auf ein dünnes, in einem engen Raume zwischen zwei dünnen Glasplatten aufgehängtes Spiegelchen geklebte magnetisirte Taschenuhrfeder, nicht ablenken. Ueber die Anode hinaus verliefen aber die Kathodenstrahlen durch das Rohr; auch unter ihrem Einflusse wurde die Magnetnadel nicht abgelenkt, obgleich, wenn an dem der Kathode gegenüberliegenden Ende des Rohres die Anode angebracht wurde, die Magnetnadel starke Ablenkungen zeigte.

Bei anderen Versuchen ging die Entladung durch einen viereckigen Kasten, der aus einem 120 mm langen und breiten und 10 mm hohen Messingrahmen und zwei darauf gelegten, 4 bis 5 mm dicken Glasplatten hergestellt war. Durch zwischengelegte dünne Guttaperchastreifen, Auflegen der erhitzten Glasplatten und Auspumpen konnte der Kasten gedichtet werden. Durch den Rahmen desselben gingen mehrere in Glasröhren gekittete Aluminiumelektroden und der Hahn zum Auspumpen. Der Kasten wurde mit einer von ihm isolirten, abgeleiteten Stanniolhülle umgeben und über einem mit Coordinatenpapier bedeckten Brette horizontal aufgestellt. 2 mm oberhalb desselben schwebte die Magnetnadel. Beim Durchleiten des Stromes ($^1/_{100}$ bis $^1/_{200}$ Daniell-Siemens) durch den Kasten wurde die Nadel abgelenkt. Bei Verschiebung desselben konnte man die Vertheilung der magnetischen Wirkung, resp. die Strömungscurven berechnen, welche mit den Niveaulinien der Potentialfunctionen der magnetischen Kräfte nahezu zusammenfallen. Dabei ergab sich beim Einsetzen von plattenförmigen Kathoden, von denen wiederum die Kathodenstrahlen nahezu in senkrechter Richtung ausgingen, dass dieselben in keiner Weise mit den Stromrichtungen zusammenfielen, vielmehr mit den Strömungscurven in festen Körpern oder Flüssigkeiten nahezu übereinstimmten. — Dass die Magnetnadel durch die Kathodenstrahlen nicht abgelenkt wird, kann indess nach Eilh. Wiedemann auch darin seinen Grund haben, dass die Masse der Magnetnadel im Verhältniss zur Steifheit der Kathodenstrahlen sehr gross ist.

719 Bringt man umgekehrt in die Nähe einer Entladungsröhre während des Durchganges des Stromes einen Magnet, so werden die Entladungen dadurch in ähnlicher Weise beeinflusst, wie andere Leiter. Indess ist hierbei die Einwirkung des Magnets auf die positive und negative Entladung

[1]) Hertz, Wied. Ann. 19, p. 798, 1883*.

zu unterscheiden. Zugleich muss man bei den Versuchen beachten, ob nicht auch durch Einwirkung der Metallmasse des Magnets für sich auf die Entladung, wie durch jeden genäherten Leiter, Ablenkungen derselben erfolgen.

720 Wir betrachten zuerst das Verhalten der negativen Entladung. Früher untersuchte man bei nicht so niederen Drucken, dass die Kathodenstrahlen deutlich hervortraten, das magnetische Verhalten des Glimmlichtes, welches indess immerhin schon Kathodenstrahlen enthalten konnte. Dasselbe ordnete sich bei Einwirkung eines Magnets im Allgemeinen in eine mit den magnetischen Curven zusammenfallende leuchtende Fläche.

In Fig. 220 und 221, welche nach Plücker[1]) ein Bild dieser Erscheinungen geben, bezeichnet *ab* die negative Elektrode, *cd* die Grenze des Glimmlichtes, *N* und *S* die Magnetpole. Liegen *N* und *S* zu beiden Seiten der in einer Kugel befindlichen und bis auf ihr Ende in eine Glasröhre eingeschmolzenen Kathode, ist letztere also äquatorial gerichtet,

Fig. 220. Fig. 221.

so bildet das blaue Licht eine Fläche, welche durch den Endpunkt der Elektrode und die Pole geht und den durch diese drei Punkte bestimmten magnetischen Curven entspricht. Die Lichtfläche ist gegen den dunk-

Fig. 222.

len Raum concav oder convex, je nachdem die durch den Endpunkt der Elektrode gehenden magnetischen Curven die eine oder andere Lage haben. Die Glaswand fluorescirt, wo sie vom Glimmlicht getroffen wird

[1]) Plücker, Pogg. Ann. 103, p. 88, 151, 1858*.

Bei einer Röhre, deren negative Elektrode ein 10 mm langer, nicht mit Glas bedeckter Draht war, bog sich das negative Licht, als dieselbe äquatorial über den Magnetpolen lag, zu einem schönen, die Pole verbindenden, gegen die Axe des Rohres in einer verticalen Ebene gebogenen und die Elektrode als Axe umfassenden Gewölbe.

Liegt die Elektrode in axialer Richtung, so formt sich auch das negative Licht stets in die Gestalt der magnetischen Curven, gleich viel, ob die Elektrode bis in die Mitte zwischen beide Pole oder nur bis zu

Fig. 223.

dem einen derselben herangeht, vergleiche Fig. 222 und 223. An den Bogen des blauen negativen Lichtes schliessen sich dann in ähnlichen Formen die von ihm durch den dunklen Raum getrennten Schichten des positiven Lichtes an. — Dieselbe Anordnung des negativen Lichtes findet sich schon bei der Einwirkung nur eines Poles des Magnets auf dasselbe.

Schärfer lässt sich das Verhalten der Kathodenstrahlen verfolgen. 721

Fällt zuerst ein Punkt der negativen Elektrode in eine magnetische Curve und coincidirt die Richtung der von ihr ausgehenden Kathodenstrahlen mit der Tangente an erstere, so legen sich die Kathodenstrahlen wie ein vollkommen biegsamer, einerseits an der Kathode befestigter, andererseits freier Leiter in die magnetische Curve, da in dieser Lage kein Grund für eine weitere Ablenkung vorhanden ist. — Lässt man die von einer plattenförmigen Kathode in einem birnförmigen Gefäss austretenden Kathodenstrahlen durch ein Loch in einer Glimmerplatte einen parallel der Axe des Entladungsapparates befestigten verticalen, mit phosphorescirendem Pulver bedeckten Glimmerschirm entlang auf eine getheilte, gegen die Röhrenaxe senkrechte Glasplatte fallen, so kann man die Ablenkung der Strahlen durch einen Hufeisenmagnet studiren, dessen Pole in der auf der Axe senkrechten Ebene neben dem Rohre liegen. Dann ist der Weg der Strahlen bei schwacher Verdünnung stärker gekrümmt, bei starker weniger[1]). — Bei Einschaltung von Funkenstrecken in den Entladungskreis, wobei die Elektricitätsmengen in jeder Entladung bedeutender werden, ergab sich kein sicheres Resultat.

[1]) Crookes, l. c., p. 158 u. f.*

722 Auch wenn die mit der Ausgangsrichtung der Kathodenstrahlen coincidirende magnetische Curve sich rückwärts gegen die Kathode hin umbiegt, werden die Kathodenstrahlen in gleicher Weise umgebogen und können eventuell die Kathode selbst dabei schneiden, wie Goldstein (vergl. §. 511) nachgewiesen hat.

723 Coincidirt die Richtung der Kathodenstrahlen nicht an einer Stelle mit einer magnetischen Curve, so werden sie im Allgemeinen, ähnlich

Fig. 224.

wie ein am einen Ende befestigter, am anderen Ende freier Leiter, abgelenkt und können Spiralform annehmen.

Fig. 225.

Diese Erscheinungen hatte schon Hittorf[1]) beobachtet und auf das Glimmlicht bezogen.

In einem kolbenförmigen Gefäss, dessen negative Elektrode bis auf ihr Ende in ein Glasrohr eingeschmolzen ist, bilden zunächst die der Axe der Elektrode parallelen Kathodenstrahlen, wenn jene Axe mit der durch das Ende der Kathode gehenden magnetischen Curve einen rechten Winkel bildet, einen Kreis, Fig. 224, sonst, je nachdem der Winkel der von der Kathode in axialer Richtung ausgehenden Strahlen mit jener Curve ein stumpfer oder spitzer ist, eine von dem Pol abgewendete oder ihm zulaufende Spirale, Fig. 225.

---

[1]) Hittorf, Pogg. Ann. 136, p. 213, 1869*.

Zugleich legen sich Strahlen kegelförmig vom Magnet um den Kreis 724 oder die Spiralen. Dies dürften vielleicht secundäre Kathodenstrahlen sein, welche von der durch den Magnet abgeleiteten Stelle der Glaswand ausgehen und sich nun direct in die magnetischen Curven ordnen.

Dasselbe gilt bei den folgenden Versuchen, bei denen beide Pole des Magnets auf die negative Entladung einwirken. Die Kathodenstrahlen winden sich dann wiederum je nach der Lage der Kathode zu einem durch ihren Mittelpunkt gehenden, auf ihr senkrechten Kreise, wenn ihre Axe äquatorial gerichtet ist, Fig. 226, sonst zu einer je nach der

Fig. 226.

Richtung der Entladung um die magnetische Curve durch den Mittelpunkt rechts oder links gewundenen Spirale (wie z. B. bei axialer Lage der Kathode, Fig. 227). Die divergirenden Strahlen legen sich an die

Fig. 227.

gebildeten Figuren heran und bilden so Cylinder, die nahe mit den magnetischen Curven zusammenfallen.

Durch die Wirkung der Magnete kann das Glimmlicht auch auf der Oberfläche der Elektroden verschoben werden, und einzelne Stellen unbedeckt lassen, die vorher frei waren. Die Wirkung folgt dabei im Allgemeinen ganz dem Biot-Laplace'schen Gesetz.

Eine Erklärung der Bildung der Spiralen ist von Stokes[1]) gegeben. 725

[1]) Stokes, Proc. Roy. Soc. March 30, 1876*; Phil. Mag. [5] 2, p. 389, 1876*.

Ist das Magnetfeld gleichförmig und gehen die Magnetkraftlinien einander parallel in der Richtung des Stromes von Pol zu Pol, so findet keine Einwirkung auf die Elemente des letzteren statt. Werden dieselben aber irgendwie von ihrer Bahn abgelenkt, so wirkt auf jedes Element eine doppelte Kraft: Ist erstens ds ein solches Element der Entladung, dessen Componenten dx, dy, dz sind, ist I die Stromintensität, R die magnetische Kraft, deren Componenten $X\,Y\,Z$ sind, dann wirken in der Richtung der Axen die Kräfte

$$I(Ydz - Zdy)/ds; \quad I(Zdx - Xdz)/ds; \quad I(Xdy - Ydx)/ds.$$

Da sich zweitens die Entladung auf dem kürzesten Wege herzustellen sucht, so erleidet sie dadurch eine Spannung τ, deren Componenten nach der X-Axe an dem einen und anderen Ende sind $-\tau\frac{dx}{ds}$ und $\left(\tau\frac{dx}{ds} + \frac{d\left(\tau\frac{dx}{ds}\right)}{ds}\right)$. Die Gleichgewichtsbedingungen sind demnach für die Kräfte nach der X-Axe:

$$I(Ydz - Zdy) + d\left(\tau\frac{dx}{ds}\right) = 0$$

und analog für die Kräfte nach der Y- und Z-Axe. Ist s die unabhängige Variable, so ergiebt sich bei Multiplication der drei so erhaltenen Gleichungen mit dx/ds, dy/ds, dz/ds und Addition $d\tau = 0$, also $\tau = const.$ Werden wieder die drei Gleichungen mit X, Y, Z multiplicirt und addirt, so folgt

$$X\frac{d^2x}{ds^2} + Y\frac{d^2y}{ds^2} + Z\frac{d^2z}{ds^2} = 0.$$

Die Normale in der Krümmungsebene steht also senkrecht auf der magnetisirenden Kraft.

Da im gleichartigen Magnetfeld X, Y, Z constant sind, so ergiebt diese Gleichung bei der Integration für diesen Fall:

$$Xdx + Ydy + Zdz = Rds\cos i,$$

wo i der Winkel zwischen der Tangente an der Lichtfläche und der Richtung der Kraftlinien ist. Werden die Gleichungen für die X-Componente der Kräfte mit dy und für die Y-Componente mit dx multiplicirt und von einander subtrahirt, so erhält man

$$I(R\cos i\,dx - Xds) + \tau\left(\frac{dz}{ds}\frac{d^2y}{ds^2} - \frac{dy}{ds}\frac{d^2z}{ds^2}\right)ds = 0$$

u. s. f., woraus, wenn der Krümmungsradius ϱ ist, beim Quadriren und Addiren der Gleichungen folgt:

$$I^2R^2\sin^2 i = \frac{\tau^2}{\varrho^2} \quad \text{oder} \quad \varrho = \frac{\tau}{IR\sin i}.$$

Die Curve ist also eine Schraube und der Krümmungsradius der Projection derselben auf eine senkrecht zur Axe gelegte Ebene ist

$$\varrho \sin^2 i = \frac{\tau \sin i}{IR}.$$

Kehrt sich der Strom um, so ändert sich τ nicht, wohl aber ändert I sein Zeichen und die Curve ist entgegengesetzt gewunden [1]).

726 Ein hier zu erwähnender Versuch ist von Domalip [2]) ausgeführt worden. Ein Entladungsrohr, in welchem zwei axiale Drahtelektroden einander auf einen kleinen Abstand gegenüber standen, zeigte in Folge des radialen Austretens der Kathodenstrahlen einen zu den Enden der Elektroden concentrischen leuchtenden Ring (vergl. §. 542). Wurde es in äquatorialer Lage zwischen spitze Magnetpole gelegt, so leuchteten nur noch die den Polen zunächst liegenden Stellen. Bildete die leuchtende Fläche einen Cylinder, so legte sich dieselbe bei der Einwirkung des Magnetes scheinbar in eine Horizontalebene.

Auch hier haben nur die in der Horizontalebene verlaufenden Kathodenstrahlen bei ihrem Ausgange von der Kathode die Richtung der von Pol zu Pol laufenden magnetischen Curven und verweilen in derselben; alle anderen Strahlen werden nach der einen oder anderen Seite gegen die Röhrenenden hin abgelenkt.

Bei axialer Lage der Röhre dreht sich entsprechend die Entladung um die verticale Axe.

727 Mit der Ablenkung der Kathodenstrahlen aus ihrer Richtung durch den Magnet verschiebt sich auch der Schatten der in ihren Weg gebrachten Schirme; divergiren die Strahlen dabei, so wird der Schatten grösser u. s. f. Die radiometrische Vorrichtung (§. 701 u. f.) rotirt ebenfalls nur, wenn die abgelenkten Kathodenstrahlen die freien Flügel treffen [3]).

Mit wachsender magnetischer Kraft nimmt die Ablenkung der Strahlen zu, wie sich auch an der Ablenkung und Verbreiterung des Schattens beobachten lässt.

728 Wie die direct von der Kathode ausgehenden Strahlen, verhalten sich auch die von einer abgeleiteten Stelle der Glaswand der Entladungsröhre ausgehenden secundären Kathodenstrahlen (vergl. §. 723).

Indem dieselben dadurch nach bestimmten Richtungen gelenkt, resp. auf einen engeren Raum beschränkt werden können, entsteht häufig bei der magnetischen Einwirkung auf das Rohr Phosphorescenz, auch selbst wenn das Gas so dicht ist, dass sie ohne Magnet nicht erscheint, so z. B., wenn Röhren auf einen Magnetpol gelegt werden, und demselben gerade gegenüber ein abgeleitetes Stück Stanniol angelegt wird [4]).

---

[1]) Eine andere Ableitung von Riecke s. Wied. Ann. 13, p. 191, 1881*. — [2]) Domalip, Wien. Ber. 81 [2], 8. Apr. 1880*; Beibl. 5, p. 153*. — [3]) Crookes, l. c. — [4]) Spottiswoode und Moulton, l. c.

729 Auch die an einer Glaswand reflectirten Kathodenstrahlen (§. 530) werden nach Eilhard Wiedemann[1]) und nach Goldstein[2]) durch den Magnet abgelenkt.

Lässt man in einer Röhre, Fig. 228, durch einen Draht δ einen Schatten auf der Seite D des Gefässes entwerfen, so ist derselbe nur gerade gegenüber der Röhre r an der direct von den Kathodenstrahlen getroffenen Stelle scharf, oben und unten, wo die von den Wänden des engen Rohres r kommenden Strahlen auftreffen, diffus. Legt man die Röhre mit dem engen Theil r äquatorial zwischen die Pole eines Magnets, so wird die Entladung gegen die obere oder untere Wand von r gedrückt, die r gegenüberliegende helle Stelle verschwindet, und es bleibt nur ein heller Schein, welcher von den von den beleuchteten Stellen von r ausgehenden Strahlen herrührt.

Fig. 228.

k a δ r D c

730 Das magnetische Verhalten der positiven Entladung ist ein etwas anderes, als das der negativen.

Aehnlich wie die negative Entladung können wir auch die positive als einen vollkommen biegsamen und elastischen Leiter auffassen, welcher indess für sich wesentlich in der Richtung von der einen zur anderen Elektrode ausgespannt ist. Derselbe ist unter dem Einflusse von Magnetpolen nur im Gleichgewichte, wenn er mit den magnetischen Curven zusammenfällt. Ist der biegsame Leiter gezwungen, auf einer Oberfläche zu bleiben, so ist er im Gleichgewichte, wenn die auf seine Elemente nach dem Biot-Savart'schen Gesetz wirkenden Kräfte in die Richtung der Normale der Oberfläche fallen und zwar gegen dieselbe hin gerichtet sind. Dies ist bei Einwirkung magnetischer Kräfte nur in den Punkten der Oberfläche der Fall, in welchen die magnetischen Curven in letztere hineinfallen.

Der erste Fall tritt ein, wenn in einer, mit verdünnter Luft gefüllten und auf einen Magnet gebrachten Glaskugel der elektrische Strom zwischen zwei Elektroden circulirt, welche beide mit zwei Punkten derselben magnetischen Curve zusammenfallen.

Der zweite Fall tritt ein, wenn sich die Elektroden an zwei Punkten der Oberfläche der Kugel befinden, in welchen beiden Punkten magnetische Curven mit ihrer Oberfläche zusammenfallen. Der Entladungsstrom muss dann zwischen beiden Elektroden auf ebenso beschaffenen Punkten der Oberfläche übergehen. Die auf diese Weise auf der Oberfläche bestimmten Curven nennt Plücker[3]) epibolisch-magnetische Curven. Denken wir uns beispielsweise zwischen die Magnetpole ein

[1]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 236, 1880*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 7. Juli 1881, p. 780*; Wied. Ann. 15, p. 253*. — [3]) Plücker, Pogg. Ann. 103, p. 88 u. 151, 104, p. 113 u. 622, 105, p. 67; 1858, 107, p. 77, 1859*.

hohles, ungleichaxiges Ellipsoid von Glas so gelegt, dass seine eine Axe in der axialen Richtung liegt, die Elektroden aber an zwei Stellen der äquatorialen Ebene in das Ellipsoid eintreten, so ist die durch letztere Ebene auf der Oberfläche des Ellipsoids verzeichnete Curve eine epibolisch-magnetische und die Entladung findet in ihr statt.

Kann die Entladung weder in der Richtung der magnetischen noch der epibolischen Curve vor sich gehen, so wird der Lichtstrom entweder zerrissen und die Entladung gänzlich gehemmt, oder der Lichtstrom wird abgelenkt und geräth in eine continuirliche Rotation, welche der eines metallischen Leiters ganz analog ist (siehe §. 748).

Nur unmittelbar an der Anode verhält sich nach Goldstein[1]) die positive Entladung anders. Ist erstere ein kurzer Draht und äquatorial gestellt, so wird eine äquatoriale Fläche gebildet, bestehend aus einem die Elektrode umgebenden elliptischen lichtlosen Raume und zwei ihn umschliessenden in einander gelagerten Lichtspiralen. Ist die Anode axial, so ist sie von einem dunklen Raume und dieser von einem Lichtcylinder umgeben.

731 Von den vielen, von Plücker mannigfach abgeänderten Versuchen über die Einwirkung des Magnets auf die von der positiven Elektrode ausgehende Entladung im luftverdünnten Raum wollen wir nur die folgenden einfacheren anführen.

Legt man über die vorn abgerundeten, etwa 4 mm von einander abstehenden Halbanker eines Elektromagnets in äquatorialer Lage eine etwa 12 mm weite Entladungsröhre mit ihrem mittleren Theil, woselbst sie in Form eines länglichen Ellipsoides ausgeweitet ist, so legt sich das Licht darin je nach der Richtung der Magnetisirung und des Stromes im Rohre gegen die obere oder untere Fläche des Rohres. Der Lichtstrom im Rohre verhält sich hier wie ein in äquatorialer Lage über den Magnetpolen ausgespannter glühender Draht, der auch, je nachdem ihn der Strom in der einen oder anderen Richtung durchfliesst, sich nach oben oder unten biegt. Indem die Entladung im Rohre nach der einen Seite gedrückt wird, leuchtet daselbst das Licht heller auf und man bemerkt einzelne Lichtblitze in demselben (namentlich in Röhren mit Zinnchlorid).

732 Ist das Gas in der Entladungsröhre so weit verdünnt, dass sich breite Schichten bilden, resp. ist die Röhre an verschiedenen Stellen ungleich weit, so dass an den Uebergangsstellen negatives Licht auftritt, so verhält sich nach Goldstein[2]) jedes Gebilde bei Einwirkung des Magnets wie ein geschlossener Complex, da jedes primäre oder secundäre negative Licht, jede positive Schicht sich zu einer einzigen magnetischen Curve zusammenrollt, unabhängig von ihrer Ausdehnung.

---

[1]) Goldstein, Berl. Monatsber. 4. Mai 1876, p. 282*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 101*; Wied. Ann. 11, p. 832, 1880*.

Reicht das Kathodenlicht weit über das Anodenlicht resp. über dessen erste Schicht hinaus, so rollt sich wiederum durch den Magnet das Ende der Kathodenstrahlen bis zur Kathode in die durch letztere gelegte magnetische Curve zusammen; durch einen dunklen Zwischenraum getrennt folgt nach der Seite der Anode die Curve, welche alle Strahlen der ersten positiven Schicht enthält u. s. f.

Erst wenn bei sehr starker Verdünnung bei engen Röhren das Licht der ganzen Entladung in einander verschwimmt, sondern sich auch bei der Magnetisirung die einzelnen Theile nicht mehr.

Diese Punkte bedürfen einer weiteren Discussion.

733 Unter dem Einfluss eines in äquatorialer Ebene die Entladungsröhren umfassenden Magnets auf den engen Theil einer Spectralröhre nimmt mit wachsender Annäherung der Pole die Zahl der Schichten zu (von 20 bis 40)[1]) und sie werden feiner und (bei Anwendung eines Inductoriums für die Entladungen) beständiger[2]), namentlich bei Annäherung des Magnets an den negativen Pol. — Dies hatte schon Poggendorff[3]) für Trichterventilröhren beobachtet. Befindet sich die eine Drahtelektrode zwischen den Magnetpolen, so kann in der dieselbe enthaltenden Abtheilung die Schichtenzahl wohl auf das 10fache, in den folgenden Abtheilungen weniger steigen. Dabei werden die Schichten gegen die Wand gedrängt.

Diese Erscheinungen zeigen sich schon bei schwächeren magnetischen Kräften, als zur Orientirung des Kathodenlichtes in eine magnetische Fläche erforderlich sind.

Ist das Licht ungeschichtet, wie bei Einschaltung kleiner Widerstände, so erzeugt auch der Magnet keine Schichtung.

734 Zugleich wird bei Einwirkung des Magnets auf die Umgebung der Elektroden in einer mit Wasserstoff gefüllten Spectralröhre die Farbe des Lichtes an den Elektroden weiss, bei Sauerstoff roth; bei Fluorkieselgas wird die grünliche Farbe blau, bei Bromgas wird die violette Farbe bläulicher und die Streifen des Spectrums werden deutlicher, namentlich bei weiteren Röhren[4]). Ist indess hierbei die Intensität der Inductionsströme so schwach, dass sie ohne Anwendung des Magnets gerade nur noch durch das Rohr hindurchgehen, so erlischt das Licht bei Einwirkung des letzteren, da der Strom jetzt einen weiteren und schmaleren Weg zurücklegen müsste. Namentlich wenn die Magnetpole sich zur Seite der positiven Elektrode befinden, tritt diese Hemmung der Entladung leicht auf. An der negativen hemmt der Magnet dieselbe nicht.

---

[1]) Wüllner, Pogg. Ann. Jubelband, p. 45, 1874*. — [2]) Trève, Compt. rend. 70, p. 36, 1870*. — [3]) Poggendorff, Pogg. Ann. 134, p. 41, 1868*. Reitlinger und von Urbanitzky, Wien. Ber. 73 [2], p. 685, 1876*. — [4]) Trève, Compt. rend. 70, p. 36, 1870*, siehe auch Chautard Compt. rend. 81, p. 75, 1875, 82, p. 272, 1876*.

735 Eine genauere Beschreibung der Einwirkung eines Jamin'schen Magnets, welcher eine 25 mm weite, 410 mm lange cylindrische Röhre mit plattenförmigen Elektroden in der Aequatorialebene umfasst, ist von Eilhard Wiedemann[1]) gegeben worden. Die Kathode war isolirt mit dem negativen Pol der Influenzmaschine, die Anode durch einen feuchten Bindfaden mit der Erde verbunden.

Wir betrachten zuerst das Verhalten der Kathodenstrahlen, welche die ganze Röhre durchziehen.

Bewirken erstens die Magnetpole eine Ablenkung der Glimmlichts- und der Kathodenstrahlen auf beiden Seiten nach der Wand, so entsteht, wenn der Magnet zwischen der Anode und der Grenze des dunklen Raumes liegt, ein grüner, von zwei schräg gegen die Axe des Rohres liegenden Ellipsen begrenzter Lichtmond, welcher von der oberen zur unteren, dem Magnet zuliegenden Seite des Rohres von der Anode zur Kathode schräg hinuntergeht. Die Kathodenstrahlen werden also auf der oberen von dem Magnet entfernten Seite des Rohres weniger stark abgelenkt, als auf der unteren, ihm näher liegenden, und erreichen die Röhrenwand erst an einer von der Kathode entfernteren Stelle. Beide Ellipsen sind scharf begrenzt, die der Anode zuliegende ist heller; sie sind etwa in dem Winkel von 40^0 gegen die Röhrenaxe geneigt.

Bei Annähern des Magnets an die Kathode rücken die Ellipsen immer näher zusammen, zunächst bei constanter Neigung. Erst wenn der Magnet dem dunklen Kathodenraum genähert wird, nimmt die Neigung bis zu etwa 15 bis 16^0 ab. Wird derselbe noch weiter gegen die Kathode verschoben, so reducirt sich die Lichtfigur auf einen Lichtfleck, der mit Annäherung des Magnets an die Kathode weiter vom Magnetpol abrückt. Je grösser die Verdünnung und der dunkle Kathodenraum ist, desto grösser ist der Abstand des Magnetpols von der Kathode, bei dem sich die halbmondförmige Lichtfläche bildet. Nach diesen Erfahrungen bieten die Kathodenstrahlen einer ablenkenden Kraft innerhalb des dunklen Kathodenraumes einen grösseren Widerstand, als nachdem sie ihn durchsetzt haben.

Werden die Kathodenstrahlen bei umgekehrter Stellung des Magnets gegen die Mitte des Rohres hingelenkt, so entsteht auf der oberen Seite desselben eine vom Magnet gegen die Anode sich erstreckende helle Lichtlinie.

736 Die Einwirkung des Magnets auf die positive Entladung zeigt sich namentlich an der Veränderung der Schichten. Wird der äquatorial liegende Magnet von der Anode aus die Röhre entlang verschoben, so behalten dieselben ihre Lage bei, bis die Mitte des durch das Kathodenlicht gebildeten grünen Ringes die vorderste Schicht schneidet. Dieselbe verschwindet dann und vereint sich mit der zweiten Schicht. Letztere rückt

[1]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. 20, p. 791, 1883*.

bei Vorwärtsschieben des Magnets vor, während aus der Anode neue Schichten hervorquellen [1]). Bei umgekehrtem Verschieben des Magnets tritt das entgegengesetzte Verhalten ein. In einzelnen Fällen verschieben sich indess nur die einzelnen Schichten mit dem Magnet, wobei indess bei der Rückwärtsbewegung des Magnets statt der Theilung der vordersten Schicht eine Verbreiterung und nachherige Verkürzung auftritt. — Ist der Magnet an der Grenze des dunklen Raumes angelangt, so bleibt die vorderste positive Schicht einen Moment stehen und rückt dann bei weiterem Vorschieben des Magnets gegen die Kathode von letzterer zurück, indem die Kathodenstrahlen und das Glimmlicht, von welchen letzteren die positive Entladung getrennt bleibt, weiter in die Röhre vordringen.

737 Führt man in einem stark evacuirten cylindrischen Rohr mit ebenen, auf der Axe des Rohres senkrechten Polplatten einen spitzen Magnet von der Anode zur Kathode, so ist zuerst unter der erwähnten Biegung des positiven Lichts die Entladung continuirlich; bei weiterem Fortschieben wird das Glimmlicht bei Seite gegen die Wand gedrückt, welche dabei phosphorescirt, und in den vom Glimmlicht entblössten Raum tritt die positive Entladung zungenförmig ein. Wird der Magnet so weit vorgeschoben, dass die Zunge bis an den dunklen Kathodenraum reicht, so geht sie plötzlich zu den Stellen über, wo das seitlich gedrückte Glimmlicht die Wand schneidet, und die Entladung wird discontinuirlich, so dass sich ein grösserer, ein höheres Potential erfordender Widerstand gebildet hat.

Für die Ausbildung des positiven Lichts ist also weniger die Lage der Kathode, als die Ausbreitung der von ihr ausgehenden Glimmlichtstrahlen maassgebend [2]).

738 Wird das §. 731 erwähnte Rohr in axialer Lage auf den Magnet gelegt, so wirken die magnetischen Kräfte auf die beiden Hälften des Lichtstromes in entgegengesetzter Richtung. Daher legt sich der der positiven Elektrode entsprechende Theil desselben in dem Ellipsoid nach dem einen Ende des horizontalen, äquatorialen Durchmessers hin und endet daselbst in einer Lichtspitze, der der negativen Elektrode entsprechende Theil geht zum anderen Ende des Durchmessers und sendet von dort wogende Flammen zu jener Lichtspitze.

739 Das verschiedene Verhalten des positiven und des negativen Lichtes, welche scheinbar ganz unabhängig von einander den magnetischen Einflüssen folgen und dabei durch einen dunklen Raum getrennt bleiben,

---

[1]) Letztere Erscheinung ist bereits von Reitlinger und von Urbanitzky (Wien. Ber. 72 [2], p. 685, 1876*) beobachtet worden. — [2]) Eilhard Wiedemann, l. c.

zeigt sich nach Plücker[1]) namentlich sehr gut, wenn man in eine Kugel von etwa 50 mm Durchmesser die Elektroden so einschmilzt, dass sie gerade nur in die Kugel hineinragen.

Es sei im Folgenden *n* die negative, *p* die positive Elektrode. Die Kugel werde zwischen die beiden genäherten, nord- und südpolaren Halbanker *N* und *S* eines grossen Magnetes gebracht.

Zuerst mögen beide Elektroden in der axialen Ebene liegen. Dann folgt das negative, von *n* ausgehende, bläuliche Glimmlicht der magnetischen Curve *NS* zwischen *N* und *S*.

Fällt nun erstens auch *p* in diese Curve, so ist die ganze Lichterscheinung in derselben concentrirt. — Fällt ferner *p* in den obersten oder untersten Punkt der Kugel, Fig. 229, so geht der positive Lichtstrom auf der Oberfläche der Kugel entlang auf der mit ihrem Durchschnitt durch die Aequatorialebene zusammenfallenden epibolischen Curve, welche sich nach vorn oder hinten legt, je nachdem sich die Elektrode *p* oberhalb oder unterhalb und *n* am Nord- oder am Südpol des Magnetes befindet. — Liegt endlich *p* in einem anderen Punkte der axialen Ebene, welcher nicht in die durch *n* gelegte magnetische Curve *NS* fällt, Fig. 230, so geht das positive Licht an der Glaswand gegen die Aequatorialebene nach hinten oder vorn hin, je nachdem *p* höher oder tiefer als *n* liegt. Dasselbe geht aber über die Aequatorialebene nicht hinaus, sondern folgt daselbst der epibolischen Curve. Es schlägt also gewissermaassen einen

Fig. 229.

Fig. 230.

Weg ein, der zwischen den Wegen liegt, welche bei den vorigen zwei Fällen beschrieben worden sind.

Liegen beide Elektroden in der Aequatorialebene, so besteht das negative Licht nur in einem kleinen Bogen, das positive Licht folgt der epibolischen Curve in einen scharf gezeichneten Lichtstreifen, von welchem aus Licht zur negativen Elektrode überfliesst.

Plücker hat noch viele Versuche über das Verhalten der Entladungen zwischen zwei durch eine Kugel parallel neben einander ausgespannten oder in einem rechten Winkel gekreuzten Elektroden u. s. f. angestellt. Bei diesen legt sich auch stets das negative Licht in die Form

[1]) Plücker, Pogg. Ann. 107, p. 88, 1859*.

der magnetischen Curven; das positive Licht verhält sich ganz so, wie es sich nach den bekannten elektromagnetischen Gesetzen aus der Einwirkung des Magnetes auf die von der positiven Elektrode gegen die negative Elektrode hin ausgebreiteten Stromeselemente berechnen lässt.

Liegen, um nur ein Beispiel anzuführen, die die positive und negative Elektrode darstellenden parallelen Drähte AB und CD, Fig. 231, in einer Horizontalebene und in axialer Richtung, und befinden sich die Magnetpole in S und N, so bildet das negative blaue Licht um CD die magnetische Lichtfläche; von den die Glaswand berührenden Stellen von AB geht aber das positive Licht in zwei entgegengesetzt gewundenen Spiralen, die sich allmählich immer mehr ausbreiten, zu der mit violettem Licht bedeckten negativen Elektrode CD über, von welcher sie indess wiederum durch einen dunklen Raum getrennt bleiben. Bei Umkehrung der Stromesrichtung liegen die Spiralen, ohne sich zu vereinen, mehr gegen die Mitte von AB hin und winden sich von dort in umgekehrter Richtung, wie vorher, gegen die negative Elektrode, Fig. 232. —

Fig. 231.

Fig. 232.

Befinden sich die parallelen, horizontalen und axial gerichteten Elektroden über einander, und ist die negative die obere, so wird das negative Licht oben von der Glaswand, unten von der die Elektrode berührenden magnetischen Curve begrenzt. Dabei kann dasselbe von der positiven Elektrode durchschnitten werden. Ist die negative Elektrode die untere, so wird das negative Licht durch zwei magnetische Curven begrenzt, deren eine durch die Endpunkte der Elektrode geht, eine andere sie in der Mitte berührt. Das positive Licht strömt von einzelnen Punkten der positiven Elektrode in Schichten nach vorn oder hinten zur negativen Elektrode, von der es durch einen dunklen Raum getrennt bleibt.

In Bezug auf die weiteren Details der mannigfach abgeänderten

und complicirten Erscheinungen müssen wir auf die Originalabhandlung Plücker's verweisen [1]).

740 Intensive Entladungen unter Einschaltung von Funkenstrecken, z. B. in Cylinderröhren mit axialen Drahtelektroden an den Enden, werden nach Goldstein [2]) zwischen Magnetpolen in die Form eines Z gebogen, dessen parallele Arme und Ebene bei axialer und äquatorialer Lage zwischen den Magnetpolen ebenfalls axial oder äquatorial liegen. Von den beiden parallelen Armen ist der eine zur Anode gehende eine gegen die Röhrenwand gedrückte schmale Lichtlinie, der andere zur Kathode gehende eine breite und bei äquatorialer Lage aufgeschwellte Fläche, welche bei geringer Intensität continuirlich, bei starker aus einzelnen magnetischen Curven zusammengesetzt ist.

Das schräge Verbindungsstück zwischen den Armen ist ebenfalls eine breite, aus magnetischen Curven bestehende Fläche.

741 Ist die Wirkung des Magnets auf eine in axialer Richtung über ihm liegende in der Mitte ellipsoidische Entladungsröhre (§. 731) zu stark, so kann eine Wiedervereinigung der beiden, entgegengesetzt abgelenkten Theile des Lichtstromes durch das Innere des Ellipsoides nicht eintreten; die Entladung ist ganz unterbrochen, wie man auch an dem veränderten Geräusch des Hammers am Interruptor des Inductionsapparates wahrnimmt.

Sind zwei mit Chlor, Jod, Schwefel oder Selen gefüllte Röhren, eine kurze enge und eine lange weite, mit einander verbunden, so wird durch die magnetische Einwirkung der Strom in der engen und kurzen unterbrochen, in der langen und weiten aber nicht, wenn man das Gas so weit verdünnt oder auch verdichtet, dass der Strom nur gerade noch hindurchgeht [3]).

Analoge Resultate findet man, wenn man durch eine Entladungsröhre eine starke Säule, z. B. die Gassiot'sche Säule von 3520 Zellen oder eine Säule von 400 Grove'schen Elementen entladet (s. w. u.).

742 Wird die die positive Elektrode enthaltende Kugel einer Spectralröhre, Fig. 139, p. 409, zwischen die Halbanker eines starken Elektromagnets gebracht und so der Uebergang der positiven Elektricität durch das ganze Rohr gehemmt, so dass sich nur seine der Elektrode zunächst liegenden Theile mit positiver Elektricität laden, so kann sich letztere mit der auf der anderen Seite der Inductionsrolle angehäuften negativen Elektricität nach dem Aufhören der inducirenden Wirkung durch die Inductionsrolle selbst ausgleichen; die positive Elektrode dient hierbei für die im Glas-

[1]) Ueber die Einwirkung eines dritten Magnetpols auf eine durch einen Hufeisenmagnet abgeleitete Entladung siehe Reitlinger u. von Urbanitzki, Wien. Ber. 1877, p. 100*; Beibl. 1, p. 416*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsberichte, 4. Mai 1876, p. 283*. — [3]) Chautard, Compt. rend. 79, p. 1183, 1874, 80, p. 1161, 1875*.

rohr angehäufte, zurückkehrende positive Elektricität als negative Elektrode und zeigt dann, wie die andere Elektrode, blaues Glimmlicht [1]).

743 In anderen Fällen ändert sich nur die Intensität der Inductionsströme, wie man nachweisen kann, wenn man von dem Schliessungskreise einen Theil des Stromes zu einem Galvanometer abzweigt. Besonders deutlich lassen sich diese Aenderungen der Stromintensität erkennen, wenn man die Geissler'sche Röhre zu einer flachen Spirale windet und so zwischen die Magnetpole legt.

Dabei zeigt sich ein Unterschied, je nachdem die Entladung zwischen den Polen in äquatorialer oder axialer Richtung fliesst.

Liegt eine gerade Röhre, z. B. von 20 cm Länge und 35 mm Durchmesser, äquatorial zwischen den Magnetpolen, so nimmt die Intensität der Inductionsströme bei der magnetischen Einwirkung ab. Werden verschiedene Gase in die Röhre eingeführt und die Inductionsströme so regulirt, dass sie bei gleichem Drucke der Gase (30 mm) am Galvanometer gleiche Ablenkung zeigen, so muss bei Einwirkung des Magnetes bei Wasserstoff, Kohlensäure, Luft, z. B. die Verdünnung auf resp. 7,5, 20,5, 13,8 mm Druck gebracht werden, wenn wiederum die Intensität der Ströme die frühere sein soll. — Hiernach soll die magnetische Wirkung mit der besseren Leitungsfähigkeit (?) der Gase steigen.

Bei der Einwirkung des Magnetes auf die Umgebung der negativen Elektrode ist hierbei entsprechend die Vermehrung des „Widerstandes" der Röhre viel bedeutender, als bei Einwirkung auf die positive Entladung.

Bei axialer Lage der Röhren nimmt dagegen die Stromintensität zu, namentlich wenn die negative Elektrode in der Nähe der Pole ist. Das Galvanometer im derivirten Stromkreise, welches ohne Einfluss des Magnetes 30° Ablenkung zeigt, giebt mit Einwirkung desselben in Luft 35, in Kohlensäure 38, in Wasserstoff 40° Ablenkung [2]).

744 Werden die beiden Hälften einer Entladungsröhre von etwa 51 cm Länge und 65 mm Durchmesser in der Mitte durch eine mit einem Hahn versehene engere Röhre mit einander verbunden, legt man die eine Hälfte in äquatorialer Lage zwischen die Pole eines sehr starken Elektromagnetes und lässt durch die ganze Röhre den Entladungsstrom hindurchgehen, so wird in der vom Magnet beeinflussten Hälfte die Entladung sehr hell und gegen die eine Röhrenseite getrieben, in der anderen Hälfte wird die Entladung etwas dunkler. Wird dann der Hahn geschlossen, und die nicht dem Einfluss des Magnetes ausgesetzte Seite gleichzeitig mit dem Oeffnen des Stromkreises mit dem Manometer der Pumpe ver-

---

[1]) Plücker, Pogg. Ann. 107, p. 87, 1859*. — [2]) De la Rive und Sarasin, Archives des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 41, p. 5, 1871*, auch Pogg. Ann. Jubelbd., p. 469, 1874*; Arch. Nouv. Sér. 50, p. 43, 1874*.

bunden, mit welchem sie schon beim Evacuiren in Verbindung stand, so zeigt sich nach de la Rive und Sarasin[1]) daselbst eine Verminderung des Druckes, die bei Oeffnung des Hahnes in der Mitte des Rohres unter Oscillationen des Quecksilbers schwindet.

Das Gas scheint also in die dem Einfluss des Magnetes ausgesetzte Hälfte des Rohres hineingezogen zu werden. Die Druckänderung ist je nach der Natur des Gases verschieden. Sie beträgt z. B. bei einem Drucke von 8 mm bei Luft 0,12 bis 0,16, bei Kohlensäure 0,08 bis 0,12, bei Wasserstoff 0,02 bis 0,04 mm. Bei stärkeren Drucken nehmen diese Aenderungen der Dichtigkeit zu. Wirkt der Magnet auf den Theil des Rohres, welcher die negative Elektrode enthält, so ist der Einfluss geringer, etwa nur die Hälfte von der Wirkung auf die positive Seite. — Hierbei wären indess die Temperaturen der Röhrentheile zu berücksichtigen.

745 Bei der seitlichen Abbiegung der Entladung in einem Rohr nach einer Seite durch den Magnet wird die Materie nicht gleichzeitig nach dieser Seite mitgenommen. Dies zeigen Versuche von Goldstein[2]).

Man bringt in ein 4 cm weites, 20 cm langes, cylindrisches, horizontal liegendes. Entladungsrohr voll Stickstoff mit den Elektroden an den Enden Natrium an einer Stelle auf der unteren Seite der Wand und evacuirt es, bis die positive Entladung den ganzen Querschnitt erfüllt. Wird das Natrium erhitzt und dadurch eine kleine Menge desselben in Dampf verwandelt, so erscheint die Entladung daselbst auf einer kleinen Stelle gelb. Wird durch einen in äquatorialer Lage genäherten Magnet die Entladung nach oben gedrückt, so erscheint sie nur in der Farbe des Stickstoffslichts und nicht gelb gefärbt. Der Natriumdampf wird also nicht vom Magnet verschoben, sondern nur die Stromesbahn geändert.

Auch verband Goldstein das Capillarrohr einer Spectralröhre durch ein mit einem Hahn versehenes Querrohr mit der Mitte einer ihr parallel gestellten weiteren cylindrischen Entladungsröhre. Zuerst wurde der Strom durch die Röhren geleitet und die Zahl der Schichten in dem die Anode enthaltenden Glascylinder des Spectralrohrs bestimmt, deren Lage sich beim Oeffnen und Schliessen des Hahns im Querrohr nicht änderte. Wurde jetzt die Entladung im cylindrischen Rohre durch Einwirkung des Magnets nach der der Spectralröhre abgelegenen Seite gedrückt, so änderten sich die Schichten in der Spectralröhre nicht, so dass keine Verdünnung in letzterer wahrzunehmen war. Dasselbe geschah, wenn der Strom in der Spectralröhre erst nach dem Durchgange eines starken Stromes einer Influenzmaschine durch die cylindrische Röhre geöffnet und geschlossen wurde.

---

[1]) De la Rive und Sarasin, l. c. — [2]) Goldstein, Wied. Ann. 12, p. 262, 1881*.

746 Finden in einer Entladungsröhre abwechselnd gerichtete Entladungen statt, so werden dieselben durch den Magnet nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt[1]).

Fig. 233.

Schiebt man z. B. auf eine gerade, etwa 60 cm lange, 10 bis 15 mm weite Geissler'sche Röhre zwei Stanniolringe in einem Abstande von 40 cm auf und verbindet dieselben mit den Enden der Inductionsrolle

Fig. 234.

des Inductoriums, so bilden sich zwischen den mit den Ringen belegten Stellen des Rohres im Inneren abwechselnd gerichtete Ströme. Wird die Röhre in axialer Richtung auf einen Magnet gelegt, so werden die Entladungen nach den entgegengesetzten Seiten der Röhre getrieben, Fig. 233.

---

[1]) Plücker, l. c. Vergl. auch über die magnetischen Ablenkungen der Entladung unter mannigfachen Verhältnissen die vielen Versuche von de la Rive, Compt. rend. 56, p. 669, 1863*; Arch. d. Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 27, p. 289, 1866*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] 10, p. 160, 1867, 20, p. 103, 1870* und wiederholt Daniel, Compt. rend. 70, p. 808, 1870*.

Dabei liegen die beiden Hälften jedes Stromes in der Horizontalebene auf entgegengesetzten Seiten des Rohres. In der Mitte laufen die positiven Ströme in zwei getrennte Spitzen aus, die sich nach unten hinabsenken, und zu denen Licht von den scheinbar continuirlich verbundenen, negativen Strömen überfluthet, so dass zwischen den Spitzen und denselben ein durch einen Kreisbogen begrenzter, dunkler Raum liegt. — Wird die Röhre in äquatorialer Lage zwischen die Magnetpole gelegt, so geht der eine Strom auf die untere, der andere auf die obere Seite des Rohres [1]). — Wird die Röhre um 45° gegen die axiale Richtung geneigt dicht über die Halbanker gebracht, Fig. 234, so trennen sich gleichfalls die Ströme. Durch die entgegengesetzte Wirkung beider Pole liegen die, jedem einzelnen dieser Ströme angehörigen Lichtlinien von der Mitte zwischen den Halbankern aus auf entgegengesetzten Seiten des Rohres und sind an letzterer Stelle durch eine Spirale verbunden. — Diese Erscheinungen zeigen sich auch schon, wenn nur die eine der beiden Stanniolbelegungen mit dem einen Ende der Inductionsspirale verbunden wird, das andere Ende derselben, wie die andere Belegung, isolirt bleibt [2]).

747 Verbindet man nur den einen Pol des Inductoriums mit der einen Elektrode einer weiten, am besten mit Kohlensäure oder Kohlenoxyd gefüllten cylindrischen Entladungsröhre und lässt den anderen isolirt, so werden ebenfalls die bei der Ladung und Entladung der Röhre entstehenden, abwechselnd gerichteten Ströme vom Magnet in zwei Stromfäden zerlegt. Der eine derselben, welcher dem Einströmen der positiven Elektricität in die Röhre entspricht, wird von einem genäherten Leiter stark abgestossen, der andere viel schwächer angezogen. Das Ueberwiegen dieser Abstossung bewirkt, dass ohne Magnet bei Annäherung der Leiter die ganze Entladung abgestossen zu werden scheint [3]).

748 Die scheinbare Rotation (§. 730) der einzelnen, auf einander folgenden Entladungen des Inductoriums unter Einfluss des Magnetes ist namentlich von de la Rive [4]) studirt worden.

Er setzte in die Tubulatur *c* eines Glasgefässes, Fig. 235, einen, bis auf seine Enden mit einer dicken isolirenden Schicht von Wachs und einer Glasröhre bedeckten Eisenstab ein und umgab denselben im Inneren des Gefässes an seinem unteren Ende mit einem von ihm isolirten kupfernen Ringe *d*, welcher vermittelst eines, durch die Tubulatur hindurchgeführten Drahtes *h* mit dem einen Pol des Inductoriums verbunden werden konnte. Nachdem in den Glasballon eine kleine Quantität

[1]) Gassiot, Phil. Trans. 1858, pt. 1, p. 14*. — [2]) Plücker, l. c. — [3]) Reitlinger und von Urbanitzki, Wien. Anz. 1877, p. 100*; Beibl. 1, p. 416*. — [4]) De la Rive, Arch. d. Scienc. phys. et nat. Nouv. Sér. 2, p. 34, 1858, 5, p. 236, 1859*; Pogg. Ann. 104, p. 129*.

Terpentinöl eingeführt war, wurde er evacuirt, mit dem Eisencylinder auf den einen oder anderen Pol eines starken Elektromagnets *M* gesetzt, und der andere Pol der Inductionsspirale mit dem Eisencylinder durch die Klemmschraube *k* verbunden. Die von dem oberen Ende des Magnets zum

Fig. 235.

Fig. 236.

kupfernen Ringe übergehende Lichtgarbe gerieth bei der Erregung des Magnetes in lebhafte Rotation in demselben Sinne, wie ein an ihre Stelle gesetzter, im gleichen Sinne vom Strome durchflossener Draht. Auf der oberen Fläche des Eisenstabes erschienen leuchtende Punkte, die bei der Erregung des Magnets gegen seinen Rand getrieben wurden.

Einen bequemeren Apparat zur Hervorbringung dieser Rotation hat Geissler construirt. In eine Glaskugel, Fig. 236, sind bei *a* und *d* Platindrähte eingeschmolzen, von denen der untere zu einem Ringe *m* im Inneren der Glaskugel umgebogen ist. Unten ist in dieselbe ein oben geschlossenes Glasrohr *H* eingeschmolzen, in welches der Eisenstab *I* eingekittet ist. Die Luft in der Glaskugel ist mässig verdünnt. Man stellt den Apparat auf einen starken Magnetpol. Werden *a* und *d* mit den Polen des Inductionsapparates verbunden, so rotirt die zwischen *n* und *m* entstehende Lichtgarbe um den Eisenstab.

Wird die Luft im Rohr sehr stark verdünnt, so tritt nach Crookes[1]) die entgegengesetzte Rotation ein, wie bei mässiger Verdünnung.

---

[1]) Crookes, Phil. Trans. 1879, pt. 2, p. 653*.

Ueber den Einfluss verschiedener Bedingungen auf die Rotationsgeschwindigkeit der Entladung hat de la Rive mittelst eines ähnlichen Apparates Versuche angestellt. 749

Zwei Apparate mit Glasglocken von 16 cm Durchmesser und 20 cm Höhe, in denen ein weicher Eisenstab von 3 cm Durchmesser mit abgerundetem Ende stand, welcher unten von einem 12 cm weiten Drahtringe umgeben war, wurden hinter einander in den Schliessungskreis des Inductoriums eingeschaltet.

Wurde in der einen Glocke das Gas stärker verdünnt, so änderte sich die Rotationsgeschwindigkeit darin, weniger in der anderen. Enthielt die eine trockene Luft, die andere wasserdampfhaltige Luft, so war bei gleichem Drucke die Rotationsgeschwindigkeit wesentlich die gleiche. Wurden aber die Glocken neben einander gestellt und der Strom zwischen beiden getheilt, so musste die trockene Luft auf 7 mm Druck evacuirt werden, während die feuchte einen Druck von 13 mm ausübte, damit durch beide Glocken gleichzeitig der Strom ging. Dann verhielten sich die Rotationsgeschwindigkeiten in beiden wie 49 : 31 (Ring +) oder wie 45 : 17 (Ring —). Also nicht nur die Intensität des Stromes, sondern auch die Natur des Gases ist von wesentlichem Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeit. Wird der Eisenstab in der einen Glocke durch einen Messingstab von gleichen Dimensionen ersetzt und werden die Glocken auf die Magnetpole gebracht, so ist die Rotationsgeschwindigkeit in jener Glocke kleiner, da der Magnetismus aus grösserer Entfernung auf den Entladungsstrom wirkt. Zugleich ist aber die Zahl der Rotationen bei stärkeren Drucken (über 8 mm Quecksilber) nahezu dieselbe, mag der Ring positiv oder negativ sein. Bei schwächeren Drucken ist in letzterem Falle die Rotation etwas schneller. Ist hierbei der Eisenkern in der einen Glocke so schwach magnetisirt, dass der Entladungsstrom in ihr nicht rotirt, so wächst bei schwachen Drucken unter 8 bis 10 mm und wenn der Ring in der ersten Glocke positiv ist, unabhängig von der Richtung der Magnetisirung, in der Glocke mit dem Messingstabe die Rotationsgeschwindigkeit, weil nun die seitliche Ausbiegung der Entladung in der ersten Glocke durch den Magnet fortfällt.

Lässt man durch einen einzelnen Apparat den Strom von der Spitze zum Ringe gehen, so findet die Rotation viel schneller statt, als wenn der Ring als positive Elektrode dient. Die Schnelligkeit der Rotation und der Unterschied der Geschwindigkeit wächst mit der Verdünnung des Gases.

So fand z. B. de la Rive[1]) in trockenem Stickstoff bei den Drucken *D* folgende Zahlen *n* der Rotationen in einer Minute:

---

[1]) De la Rive, Compt. rend. **56**, p. 674, 1863*; Arch. des Scienc. phys. et nat. Nouv. Sér. **27**, p. 289, 1866*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **10**, p. 159, 1867, **20**, p. 113, 1870*.

D		35	29	21	16	12	8	6	5 mm
Ring +	n	12	27	45	67	99	115	—	—
Ring —	n	—	—	36	57	59	70	115	150

Bei 4 mm Druck ist die Geschwindigkeit der Rotation so gross, dass man sie nicht mehr verfolgen kann.

Wird die Luft sehr stark verdünnt, so bildet sich aus dem Lichtstreifen eine immer breitere, blaue Fläche, welche zuletzt von der Spitze zum ganzen Ringe geht und in der dann keine Rotation wahrzunehmen ist. In reinem Wasserstoff tritt die Rotation sehr schwer auf, leichter in Luft und Stickstoff. Enthält das Gas Wasserdampf, so ist die Rotation schneller, als in trockenem Gase. Lässt man dabei den Druck allmählich wachsen, so zieht sich, wenn der Ring als positive Elektrode dient, die allseitig ausgebreitete Lichthülle zu mehreren (5 bis 6) gleich weit von einander entfernten, einzeln rotirenden Lichtstreifen zusammen. — Alkoholdampf verhält sich ebenso.

Bei verschiedenen Gasen ergab sich die Rotationsgeschwindigkeit nahezu proportional ihrer Dichtigkeit [1]).

750 Bei anderen Versuchen haben de la Rive und Sarasin (l. c.) in einer Glocke, in welcher die Entladung in horizontaler Richtung rotirte, etwas unterhalb derselben concentrisch zur Rotationsaxe eine kleine horizontale Elfenbeinnadel auf einem Achathütchen balancirt, und an ihren Enden vertical nach oben zwei 5 cm grosse dünne, kreisförmige Glasplatten angebracht, welche bei dem Rotiren der Entladung von derselben getroffen und mitgeführt wurden. In 30 Secunden machten sie, als sie eine gleichförmige Geschwindigkeit erlangt hatten,

Druck	in Luft	Druck	in Wasserstoff
10 mm	11	38 mm	32
8	16	18	46
5	25	1	54
4	30	—	—

Umdrehungen.

Wurde von zwei Stellen eines in den Schliessungskreis eingefügten Troges voll destillirtem Wasser ein Theil des Stromes zu einem Galvanometer abgezweigt, so zeigte sich eine, namentlich in der Luft, bedeutende Verminderung der Stromintensität, wenn die Entladung zugleich den Rotationsapparat mit sich führte.

Auch ohne jenen Apparat nahm in der Luft die Intensität ab, wenn die Entladung rotirte. So war bei einem Druck von 18 mm die Intensität ohne Rotation 28°, mit Rotation, ohne Rotationsapparat (102 Drehun-

---

1) De la Rive und Sarasin, Compt. rend. **74**. p. 1141, 1872*; Arch. des Scienc. phys. et nat. Nouv. Sér. **45**, p. 387, 1872*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] **29**, p. 207, 1873*.

gen der Entladung in 30 Secunden) 21°, mit Rotation der Entladung (82 Drehungen) und mit Rotationsapparat (22 Drehungen) 18°.

Wird die Intensität des den Magnet erregenden Stromes vermindert, dagegen die Intensität des die Entladung erzeugenden Stromes in dem Verhältniss vermehrt, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Entladung constant bleibt, so ist der Unterschied zwischen der Intensität des Stromes mit und ohne Einwirkung des Magnets, also mit und ohne Rotation um so grösser, die Verminderung der Stromintensität durch die Rotation um so bedeutender, je schwächer der die Entladung bewirkende Strom ist. Rotirt dagegen die Entladung, während sie nur in radialer Richtung von einer über einem Magnetpol angebrachten Elektrode zu einem sie umgebenden Ringe übergeht, so ändert sich dabei die Stromintensität nicht.

Wird die Glocke selbst in Rotation versetzt, so ändert sich die Intensität nicht; auch nicht, wenn dieselbe schneller ist, als die der Entladung; ebenso wenig, wenn man den Strahl durch eine Glasplatte gegen die kalte Wand der Glocke drängt.

Diese Versuche sprechen dagegen, dass allein die Abkühlung der Entladung durch die Plättchen des Rotationsapparates die Verminderung der Stromintensität bedingt; vielleicht könnte sie durch die Arbeitsleistung bei der Drehung des Apparates hervorgerufen sein.

Die Erklärung dieser Erscheinungen dürfte die folgende sein. 751 Gleichviel, in welcher Weise der Elektricitätsstrom im Gase zu Stande kommt (siehe das Capitel Theorie der Entladungen), stets wird durch den Magnet jedes Element der Entladung seitlich abgelenkt. Folgen einzelne Entladungen auf einander, so findet jede folgende in der abgelenkten Bahn der vorhergehenden eine veränderte Gasschicht, in der sie leichter übergeht[1]); die Rotationsgeschwindigkeit, mit der sich die Entladungen drehen, ist demnach um so grösser, je öfter stärkere oder schwächere Entladungen in der Zeiteinheit auf einander folgen. Da nun diese Aufeinanderfolge bei etwas weiterer Entfernung der Elektroden schneller eintritt, wenn die positive Elektrode die grössere ist, so ist die Rotation der Entladungen lebhafter, wenn der Ring als positive Elektrode dient, als im umgekehrten Falle, ganz wie de la Rive beobachtet hat.

Da bei gleicher elektromotorischer Kraft die Zahl der Entladungen mit wachsender Verdünnung zunimmt, so beschleunigt sich ebenfalls die Rotation.

Freilich lässt sich nachweisen, dass in sehr verdünnten Gasen die Entladungen instantan sind, und zwischen zweien derselben das Gas völlig in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt; indess können bei den von de la Rive angewandten höheren Drucken eventuell andere Verhältnisse eintreten. Auch diese Punkte sind noch weiter aufzuklären.

---

[1]) Vergleiche die Versuche von Fernet bei der Funkenentladung in der Luft.

752 Ist das Gas in dem beschriebenen Rotationsapparat so wenig verdünnt, dass neben der Gasentladung auch Metallfunken zwischen den Elektroden übergehen, so findet jeder folgende Funken in der abgelenkten Gasentladung eine leichter zu durchschlagende Bahn, so dass auch die Metallfunken mit der Gasentladung rotiren. Indess dürfen erstere dabei nicht zu sehr in den Vordergrund treten; da sonst die die Bahn bezeichnende Gasentladung nicht hinlänglich ausgebildet ist.

Lässt man durch de la Rive's Rotationsapparat zwei Inductionsströme in entgegengesetzter Richtung fliessen, so rotiren die Entladungen nicht mehr, sondern oscilliren nur um einige Grade hin und her; fliessen sie in demselben Sinne, so findet die Rotation statt [1]). Die Erklärung dieser Erscheinungen ergiebt sich aus den Erläuterungen des §. 751. Da jede folgende Entladung bei abwechselnd gerichteten Strömen immer wieder gegen die vorhergehende im entgegengesetzten Sinne abgelenkt wird, so verweilen die sämmtlichen Entladungen an derselben Stelle.

10. Theoretische Ansichten über den Durchgang der Elektricität durch Gase.

753 Die Beobachtung, dass zur Einleitung einer Entladung in einem luftverdünnten Raume bei langsamer Zufuhr der Elektricitäten zu den Elektroden, z. B. durch die Influenzmaschine, ein bestimmtes endliches Potential aller Elektricitäten auf die auf der Flächeneinheit an der kritischen Stelle befindliche Elektricität erforderlich ist, welche auch bei Anwendung einer galvanischen Säule von nicht zu kleinem Widerstande durch die Versuche von Warren de la Rue und Hugo Müller bestätigt wird, und dass das Potential an der negativen Elektrode dabei kleiner ist, als an der positiven, hatte mich im Verein mit Herrn Rühlmann [2]) veranlasst, die folgende mechanische Theorie der Entladungen aufzustellen.

Wir nehmen an, dass die Elektricitäten, um von den Metallelektroden zu den Gasen überzugehen, einen bestimmten Antrieb nöthig haben. Dies könnte darauf beruhen, dass die Metalle die Elektricitäten mit einer gewissen Kraft anziehen; indess müsste dieselbe für alle Metalle die gleiche sein, da die Entladungen bei ihnen cet. par. bei demselben Potential beginnen. Der Grund könnte auch sein, dass irgend ein Uebergangswiderstand zwischen den Elektroden und dem Gase existirte, welcher erst durch eine endliche Potentialdifferenz durchbrochen werden

[1]) Trève, Compt. rend. 70, p. 928, 1870*. — [2]) G. Wiedemann und R. Rühlmann, Ber. der K. Sächs. Ges. der Wissensch. Math.-phys. Cl. 20. Oct. 1871*; Pogg. Ann. 145, p. 394, 1872*.

müsste; etwa indem die Gase auf den Elektroden zu einer sehr schlecht leitenden isolirenden Hülle condensirt wären, welche wie eine Glashülle bei der Entladung durchbrochen werden müsste.

Sind die elektrischen Abstossungskräfte, welche die an der Oberfläche der Elektroden befindlichen Elektricitäten antreiben, durch stärkere Ladung der Elektroden so bedeutend geworden, dass die Hindernisse, welche ihrer Fortführung entgegenstehen, durch dieselben überwunden werden, so müssen die elektrischen Massen sich sogleich mit einer grösseren, jenen Hindernissen entsprechenden, endlichen Geschwindigkeit von den Elektroden fortbewegen. Es wäre möglich, dass sich hierbei die Elektricitäten in den Gasen von Theilchen zu Theilchen fortpflanzten. Es könnte auch sein, dass die an der Metallelektrode elektrisirten Gastheilchen von derselben fortgetrieben würden, dann auf entferntere Gastheile stiessen und diesen ihre Bewegung und Elektricität mittheilten.

Endlich könnten in gewissen Fällen, bei plötzlicher Zufuhr von Elektricität von hoher Spannung zu den Elektroden, die von der Elektrode fortgetriebenen Gastheilchen mit der in ihnen enthaltenen Elektricität durch das umgebene Medium auf grössere Entfernungen mit einer so grossen Geschwindigkeit, dass dieselbe einer bis zum Leuchten gesteigerten Temperaturerhöhung entspräche, fortgeschleudert werden.

Nach der von uns früher aufgestellten Ansicht sollte der zweite Vorgang den Erscheinungen in hinlänglich verdünnten Gasen entsprechen.

Sind die Elektroden so weit von einander entfernt, dass sie nicht mehr auf einander influenzirend wirken, ist die eine von ihnen abgeleitet, die andere elektrisirt, so bedarf es nach §. 580 bei positiver Elektrisirung eines grösseren Potentials (wiederum auf die auf der Flächeneinheit an der kritischen Stelle aufgehäufte Elektricität) zum Beginn der Entladung, als bei negativer Elektrisirung. Mithin muss die Bewegung der Elektricität selbst, oder der mit Elektricität geladenen Gastheilchen von der Elektrode fort mit grösserer Anfangsgeschwindigkeit vor sich gehen, wenn die Elektrode positiv ist, als wenn sie negativ ist.

Hiernach schreitet die Entladung in gleicher Zeit weiter von der positiv geladenen Elektrode fort, als von der negativen. Bei gleicher Elektricitätszufuhr nehmen wir bei der Ableitung der einen Elektrode an der positiven Elektrode seltenere, aber weiter in die Umgebung sich sichtbar ausbreitende, an der negativen häufigere, aber auf die nähere Umgebung der Elektrode beschränkte Entladungen wahr.

Um ein Beispiel für die Verschiedenheit dieser Geschwindigkeiten zu geben, wählen wir die Entladungen zwischen zwei gleich grossen Kugeln in der Luft. Bei 81,1 mm Druck verhalten sich die zu einer Entladung erforderlichen Elektricitätsmengen bei Ableitung der positiven und negativen Kugel z. B. wie $12{,}3 : 21{,}7 = 1 : 1{,}76$. Die Potentiale auf die auf der Einheit der Oberfläche der Elektroden angehäuften Elektricitäten verhalten sich demnach wie $1 : (1{,}76)^2 = 1 : 3{,}13$. Die An-

fangsgeschwindigkeiten der Entladungen müssten in demselben Verhältniss stehen [1]).

Der so oft gebrauchte Ausdruck, dass die positive Elektricität leichter aus den elektrisirten Körpern ausströmt, als die negative, ist demnach nicht richtig.

Hierdurch erklärt sich unmittelbar der wesentliche Unterschied der verschiedenen Formen der Entladungen im luftverdünnten Raume, der positiven Büschelentladung und des negativen Glimmlichtes.

Würde nur die an der Stelle der Maximaldichte angehäufte Elektricität bei der Entladung fortgeführt werden, so bliebe in den leitenden Systemen noch der grösste Theil der Ladung zurück, während sie sich doch in der That dabei mehr oder weniger vollständig entladen. Indess ist an jener Stelle das Gas verändert, resp. die isolirende Uebergangsschicht ist durchbrochen und die früheren Zustände können sich nicht sofort wiederherstellen. Es genügt daher das verminderte Potential daselbst, um auch noch eine weitere Entladung zu vermitteln.

Würde ferner in dem eben betrachteten Falle die Elektricität mit unendlicher Geschwindigkeit fortgeführt, so könnte die Entladung nur von der einen Stelle der Elektrode ausgehen, wo die Dichtigkeit der Elektricitäten ein Maximum ist. Breitet sich aber die elektrische Entladung mit geringerer Geschwindigkeit von der kritischen Stelle aus, so kann die daselbst kurze Zeit verweilende Elektricität auf die Vertheilung in der Elektrode zurückwirken und nun bei weiterer Elektricitätszufuhr auch an den benachbarten Stellen das zur Entladung erforderliche Potential sämmtlicher Elektricitäten auf die auf der Flächeneinheit daselbst befindliche erreicht werden. — Je geringer die Anfangsgeschwindigkeit der Entladung ist, desto mehr muss diese Erscheinung hervortreten. Wir bemerken daher namentlich auf der negativen Elektrode eine weitere Ausbreitung des Glimmlichtes, als an der positiven, wo die Entladung von einem kleineren Theile der Oberfläche ausgeht.

Es seien ferner zwei gleiche Elektroden einander gegenübergestellt und beide isolirt mit den Zuleitern der Elektrisirmaschine verbunden. Dann sind die Potentiale auf ihnen in jedem Moment gleich. Beginnt nun die Entladung an der negativen Elektrode, so schreitet dieselbe mit geringer Geschwindigkeit zur positiven Elektrode vor; und so kann in Folge der eben angeführten Gründe die Ladung in beiden Elektroden noch so weit anwachsen, bis auch an dem vordersten Punkte der positiven Elektrode das zur Erzeugung der Entladung nöthige Potential erreicht ist und daselbst eine Entladung mit grösserer Anfangsgeschwindigkeit eintritt. In dieser Zeit wächst dann die Ladung der neben der vordersten Stelle der negativen Kugel liegenden Theile noch

[1]) Plücker (Pogg. Ann. 107, p. 89, 1859*) nahm in Folge seiner Versuche über die Einwirkung des Magnetes auf die elektrische Entladung an, dass nur die positive Elektricität sich zur negativen Elektrode hinbewegt.

so stark an, dass auch von ihnen die Glimmentladung ausgeht. Wenn ferner bei geringerem Druck der Luft eine schwächere Ladung der Elektroden zur Erzeugung der Entladung genügt, und sie sich dann auch mit geringerer Geschwindigkeit fortpflanzt, so breitet sich auch hierbei das Glimmlicht auf der negativen, das Büschellicht auf der positiven Elektrode weiter aus. Diese Erscheinung wird dadurch befördert, dass bei der schwächeren Ladung der Elektroden auch die absoluten Differenzen der an ihren einzelnen Stellen angehäuften Elektricitätsmengen kleiner sind. Liefert demnach die Elektricitätsquelle in gleichen Zeiten gleiche Elektricitätsmengen, so würde bei schwächeren Drucken schon hierdurch in der Nachbarschaft des Ortes des Maximalpotentials schneller eine zur Erzeugung einer Entladung genügende Dichtigkeit hervorgerufen werden, als bei höheren Drucken. Dem entsprechend haben wir schon oben erwähnt, dass man an der Verbreiterung der Bilder der negativen Elektrode im rotirenden Spiegel bei sehr geringen Drucken eine kurze Zeitdauer der Entladung daselbst beobachten kann.

In Folge der grösseren Geschwindigkeit der von der positiven Elektrode ausgehenden Entladung, der kleineren Geschwindigkeit der von der negativen Elektrode ausgehenden treffen dieselben im Allgemeinen in der Nähe der negativen Elektrode zusammen. Die von einer kleineren Stelle ausgehende positive, mehr zusammengedrängte Entladung scheint sich dabei auf der von einer grösseren Fläche ausgehenden negativen auszubreiten (ähnlich wie ein Wasserstrom auf einer ruhenden Wasserfläche); die fortschreitende Bewegung der Elektricitäten geht verloren, sie gleichen sich in dem dunklen Raume aus, in welchem keine bestimmte Strömung der Elektricität mehr wahrzunehmen ist. Dem entsprechend konnte de la Rive (s. w. u.) von zwei von der Seite her in den dunklen Raum eines weiten Geissler'schen Rohres eingesenkten Platinplatten keine oder nur schwache derivirte Ströme zu einem Galvanometer ableiten. Je langsamer die Entladungen einander folgen, je schneller also die Entladungen von beiden Elektroden aus fortschreiten, desto schmaler muss entsprechend der dunkle Raum werden; und dies tritt in der That bei vermehrter Dichtigkeit der Gase ein.

Mit dieser Erklärungsweise stimmt die äussere Erscheinung der Entladungen zwischen zwei Elektroden überein, wenn sie beide isolirt mit der Elektrisirmaschine verbunden sind, oder wenn die eine von ihnen abgeleitet ist. Ist z. B. die positive Elektrode eine grössere Kugel von 13,8, die negative Elektrode eine kleinere Kugel von 2,6 mm Durchmesser, so geht bei einem Drucke von etwa 35 mm die positive Entladung von einer kleinen Fläche der ersteren aus, verjüngt sich ein wenig gegen die negative Elektrode hin und breitet sich gegen letztere bis zu dem schmalen, dunkelen Raum wieder aus. Wird die grosse positive Kugel zur Erde abgeleitet, so bedarf es zur Erzeugung der Entladung einer grösseren Elektricitätsmenge; in demselben Verhältniss ist der Unterschied der Dichtigkeit der Elektricität auf den einzelnen Stellen der

kleineren Kugel von der Axe an bedeutender, daher zieht sich das Glimmlicht auf eine kleinere Fläche zusammen. Auf der grösseren Kugel, welche nur durch Influenz elektrisirt ist, sind die Dichtigkeitsdifferenzen rings um die Axe kleiner; die positive, weniger leuchtende, bläuliche Entladung breitet sich weiter über ihre Oberfläche aus; sie dehnt sich nebelartig gegen die negative Elektrode aus, erst sich ein wenig verjüngend, dann wieder verbreiternd. Die beschleunigenden Kräfte treiben nämlich die elektrisirten Theilchen anfangs convergirend zur kleineren Elektrode hin, dann aber breiten sie sich wieder aus, theils durch ihre gegenseitige Abstossung, theils beim Zusammentreffen mit der annähernd in Kugelschalen sich ausbreitenden, negativen Entladung. Wird dagegen die negative Kugel zur Erde abgeleitet, so bedarf die positive Kugel zur Erlangung des zu einer Entladung erforderlichen Potentials wiederum einer grösseren Elektricitätsmenge, als ohne Ableitung, die absoluten Differenzen der Dichtigkeiten von dem vordersten Punkte an nach hinten sind grösser, die Entladung findet von einer kleineren Stelle statt und ist schmaler. Dagegen breitet sich das Glimmlicht auf der negativen Elektrode weiter aus in Folge der zur genügenden Ladung der positiven Elektrode erforderlichen längeren Zeit.

Bei umgekehrter Verbindung der beiden Elektroden mit den Polen der Elektrisirmaschine zeigen sich im Allgemeinen die analogen Verhältnisse, nur sind die Unterschiede bei der Ableitung weniger deutlich.

Auch die §. 537 erwähnte Ausbreitung der positiven und negativen Entladung zwischen einer Spitze und einer Platte lässt sich ähnlich erklären.

754 Indess ist die der vorstehenden Theorie zu Grunde liegende Hypothese, dass die Entladung in einer directen Fortschleuderung von materiellen Theilchen von den Elektroden aus besteht, in vollem Umfange zunächst für die positive Entladung aus mehrfachen Gründen nicht beizubehalten, wie Eilhard Wiedemann[1]) nachgewiesen hat.

Aus Versuchen von Wheatstone, bei denen er das Bild eines 6 Fuss langen, evacuirten Rohres, durch welches die Entladungen hindurchgingen, in einem Spiegel, der um eine dem Rohr parallele Axe rotirte, durchaus ebenso, wie in einem ruhenden sah[2]), kann man schliessen, dass die Geschwindigkeit der Entladungen grösser als 200000 m sein muss; mit einer entsprechenden Geschwindigkeit müssten sich also die fortgeführten Molecüle bewegen.

Als ferner von Zahn[3]) die Spectrallinien eines Entladungsrohres einmal in der Richtung senkrecht zur Axe, dann in der Richtung derselben untersuchte, verschoben sich die Linien nicht, trotzdem er noch

---

[1]) Eilhard Wiedemann, Wied. Ann. **9**, p. 161, **10**, p. 245, 1880*. — [2]) Wheatstone, Phil. Trans. 1835 [2], p. 583*; Pogg. Ann. **34**, p. 468, 1835*. — [3]) v. Zahn, Wied. Ann. **8**, p. 675, 1879*.

$^1/_{40}$ des Abstandes der D-Linien beobachten konnte, welche Verschiebung einer Geschwindigkeit von 1 geogr. Meile in der Richtung der Axe entsprochen hätte.

Weitere vorläufige Versuche von Tait[1]), bei denen die Spectra einer Röhre mit Bromkohlenstoff parallel und senkrecht zur Entladungsrichtung ganz gleich stark abgelenkt wurden, ergaben, dass die Geschwindigkeit viel grösser als 90 Meilen in der Secunde sein musste.

P. Riess[2]) sucht die ungleiche Ausbreitung der Elektricitäten, freilich zunächst in Luft von gewöhnlicher Dichte, auf festen Körpern, Harzschichten und Kartenblättern darauf zurückzuführen, dass sich der feuchte Luftstrom beim Vorbeiströmen an den Elektroden negativ ladet und sich dadurch die positive Elektricität leichter ausbreitet. Dasselbe nahm man für die verdünnten, bei den Elektroden der Entladungsröhren vorbeiströmenden Gase an[3]). Da indess die ungleiche Ausbreitung auch in ganz trocknen Gasen stattfindet, welche nach Faraday (Bd. I, §. 259) sich beim Vorbeifliessen an festen Körpern durchaus nicht laden, so ist diese Ansicht nicht aufrecht zu erhalten. 755

Aus demselben Grunde sind die Theorien unrichtig, mittelst deren man die Schichtung der positiven Entladung durch mechanische Bewegung der Gastheilchen zu erklären gesucht hat. 756

Man hat die Schichtung wohl auf einzelne auf einander folgende Partialentladungen zurückführen wollen, deren jede für sich durch das Gas hindurchginge[4]). Indess tritt die Schichtung auch bei einer einzigen Entladung auf, z. B. bei langsamer Annäherung einer mit der einen Elektrode des andererseits abgeleiteten Entladungsrohres verbundenen Kugel an einen geladenen Conductor bis zum Durchgang der Elektricität. Auch erscheinen im rotirenden Spiegel alle einzelnen Entladungen in einem Entladungsrohre geschichtet. Diese Ansicht ist also auch zu verlassen.

Riess[5]) vergleicht die Schichtenbildung mit der Ausbiegung von dünnen Drähten durch starke Entladungen und der Funkenbildung an den in eine mässig leitende Flüssigkeit eingesenkten Elektroden bei der Batterieentladung, wobei in der Schliessung Stellen continuirlicher und discontinuirlicher Leitung mit einander wechseln. Da die Anhäufung von Elektricität an der positiven Elektrode am grössten ist, so könne man annehmen, dass von dieser Elektrode zuerst ein Funken ausgeht und 757

---

[1]) Tait, Proc. Edinb. Roy. Soc. 1879 u. 1880, p. 430*. — [2]) Riess, Pogg. Ann. 69, p. 1, 1846*; Reibungselek. 2, p. 212, §. 749 bis 751, 1853*. — [3]) Eine ähnliche Ansicht ist zur Erklärung der Gasentladungen in einer während des Druckes erschienenen Abhandlung von O. Lehmann, Wied. Ann. 22, p. 305, 1884*, aufgestellt worden. — [4]) Auch Puluj, l. c. Neyreneuf, Ann. de Chim. et. de Phys. [5] 8, p. 511, 1876*. — [5]) Riess, Pogg. Ann. 106, p. 77, 1859*, vergl. auch Morren, Cosmos, 14, p. 128, 1859*.

hierdurch die Luft vor demselben verdichtet wird; dadurch soll sie die continuirliche Entladung besser leiten, und in ihr findet dann eine Leitung der Elektricität ohne Lichtentwickelung statt, bis sie wieder in der folgenden Schicht von verdünnterer Luft in Funkenform übergeht.

Wie bei der Entladung in Flüssigkeiten soll die Verlängerung der Intermittenzstellen, also auch die Schichtung des elektrischen Lichtes in der Luft, nur bei einer geringeren Dichtigkeit der sich entladenden Elektricitätsmengen auftreten. Sie zeigt sich daher besser bei Anwendung nicht zu starker Säulen zur Erregung des inducirenden Stromes. Sie wird dagegen verhindert, wenn man jene Elektricitätsmengen vergrössert.

In dem dunklen Raume an der negativen Elektrode sollte die Elektricität mechanisch mit den Lufttheilchen fortgeführt werden. Dafür spräche nach Riess auch das Auftreten des blauen Glimmlichtes an der negativen Elektrode selbst, welches nie ohne eine wirkliche Bewegung der Luft erscheinen sollte.

758 De la Rive[1]) sucht ebenfalls die Bildung der Schichten auf die Herstellung verschieden dichter Stellen zurückzuführen, von denen die dichteren, schlechter leitenden erglühen, die besser leitenden, verdünnten aber dunkel bleiben. Er stützt sich dabei namentlich auf seine Versuche (§. 688) über die relativ niedrige Temperatur des dunklen Raumes und parallelisirt das Verhalten mit dem einer Reihe an einander gelötheter, abwechselnd gut und schlecht leitender Drähte.

Auch Bückmann[2]) nimmt eine solche Theilung des Gases in dichtere und dünnere, nahezu gleich dicke Schichten an. Das Ende der positiven Elektrode ist mit einer Schicht von relativ grosser Dichte umgeben; auf die letzte Verdichtung folgt wieder eine Schicht von geringerer Dichte, und zwar von grösserer Dimension als die übrigen Verdünnungen. Die negative Elektrode ist von einer Atmosphäre umgeben, deren Dichte wahrscheinlich zwischen der kleinsten Dichte (im dunklen Raum) und der grössten (in den positiven Lichtschichten) gelegen ist. Die Schichten sollen die Potentialniveaux der positiven Elektrode darstellen.

W. Spottiswoode und J. F. Moulton[3]) fassen ebenfalls die Schichten als Orte auf, wo die Materie in grösseren Mengen angehäuft ist, als im dunklen Raume, und suchen Gründe dafür in ihrer scharfen Begrenzung gegen die negative Elektrode, ihrer höheren Temperatur gegenüber derjenigen in den dunklen Räumen u. s. f.

759 Quet und Seguin[4]) nehmen an, durch die Vertheilung der Elektricität von den Elektroden aus theile sich die Gasschicht zwischen

---

[1]) de la Rive, Compt. rend. 56, p. 669, 1863*; Arch. des Sc. phys. et nat. Nouv. Sér. 18, p. 53*; Ann. de Chim. et de Phys. [4] 8, p. 455, 1866*; Pogg. Ann. 131, p. 577*. — [2]) Bückmann, Dissertation, Amsterdam, p. 788*; Beibl. 6, p. 256*. — [3]) Spottiswoode und Moulton, Proc. Roy. Soc. Lond. 32, p. 385, 1881*; Beibl. 7, p. 725*. — [4]) Quet u. Seguin, Ann. de Chim. et de Phys. [3] 65, p. 317, 1862*.

ihnen, wie ein anderer fester, der Influenz ausgesetzter, schlechter Leiter in einzelne, von den Elektroden aus immer schwächer elektrisirte, abwechselnd positiv und negativ geladene Schichten. Indem nun die entgegengesetzten Elektricitäten sich anziehen, bewegen sich zugleich die mit ihnen beladenen Gasschichten; dieselben verdichten sich deshalb zwischen der ersten positiven und negativen Schicht, verdünnen sich zwischen der ersten negativen und der zweiten positiven Schicht u. s. f.

Bei gehöriger Verdichtung entladen sich die Elektricitäten in Funkenform durch die verdichteten Schichten, da die Anziehung der Elektricitäten bei ihrer Annäherung in denselben schneller zunimmt, als dabei die der Verdünnung proportionale Leichtigkeit der Durchbrechung der verdünnten Luftschichten abnimmt.

In dem später zu beschreibenden Versuche, bei welchem Kohlenpulver durch die hindurchgehende Entladung des Ruhmkorff'schen Apparates geschichtet wird, sehen Quet und Seguin eine Bestätigung ihrer Theorie. Dass die Schichtung bei Verdünnung der Gase leichter hervortritt und breiter wird, erklären sie aus der grösseren Schlagweite, welche die gleichen Elektricitätsmengen in verdünnteren Gasen haben. — Auch dass man bei Anwendung von Metalldämpfen nach Faye breitere und schwächer gezeichnete Streifen erhält, soll der mitgetheilten Theorie entsprechen, da diese Dämpfe besser leiten, und so die abwechselnden positiven und negativen Schichten immer breiter werden müssen. — Der dunkle Raum zwischen der positiven und negativen Entladung scheint ihnen dieselbe Natur zu haben, wie die übrigen dunklen Schichten, da er durch alle Bedingungen, welche letztere beeinflussen, in gleicher Weise abgeändert wird.

760 Reitlinger[1]), welcher mit v. Ettingshausen beobachtet hat, dass an den weiten und engen Stellen der Geissler'schen Röhren das Spectrum des Lichtes verschieden ist, glaubt dagegen, dass durch die Inductionsströme eine derartige Zersetzung der in den Röhren enthaltenen Gase stattfinde, dass sich die Zersetzungsproducte schichtenweise lagern, so z. B. in Röhren, die Wasserdampf enthalten, der Wasserstoff und Sauerstoff, und nun die Entladung durch den besser leitenden Wasserstoff einfach geleitet werde, den Sauerstoff aber in Funken durchbreche. In einer Röhre, die nur ein wasserfreies Luftvacuum enthält, soll daher die Schichtung nicht auftreten. Bei geringen Mengen von Wasserstoff zeigen sich im Spectrum der Entladung die charakteristischen Wasserstofflinien (s. u.). Bei Zutritt von etwas mehr Wasserstoff (6 mm Quecksilberdruck) tritt dann eine feine Perlenschichtung in einigen Theilen des Rohres auf, dagegen verschwinden die Wasserstofflinien im Spectrum, da dasselbe nun die Entladung ohne Lichterscheinung leiten soll. Ebenso würde reiner Quecksilberdampf wegen seiner guten Leitungsfähigkeit

---

[1]) Reitlinger, Sitzungsber. d. Wien. Akad. 43, p. 15, 1861*.

keine Schichtung zeigen. In einfachen Isolatoren, Sauerstoff u. s. f. wäre ebenfalls keine Schichtenbildung möglich.

Später sehen Reitlinger und Zerjau[1]) die Ursache der Schichtenbildung in einer mechanischen Theilung der Gase in bewegte und ruhende Schichten, an deren Knotenpunkten die schwerer beweglichen Stoffe angesammelt werden. Von den geschichteten Stoffen sollen die schlechter leitenden stärker ins Glühen gerathen.

Van der Willigen[2]) sieht die Ursache der Schichtung ebenfalls in einer Sonderung der Gasgemenge in besser und schlechter leitende Schichten. Die besser leitenden Schichten leiten den Strom ohne zu leuchten, die anderen leuchten.

Da sich die Schichten auch in einfachen Gasen, Wasserstoff u. s. f. bilden, ist die Annahme einer chemischen Zersetzung der Gase nicht wahrscheinlich; gegen die Theilung der Gassäule in ruhende und bewegte, und aus einem nicht anzugebenden Grunde besser oder schlechter leitende, dünnere und dichtere Schichten ist mit Eilhard Wiedemann anzuführen, dass dieselbe jedenfalls eine viel längere Zeit erforderte, als der kurze Durchgang einer Entladung, die Schichtung sich aber schon bei jeder ersten Entladung zeigt.

761 Nach der von mir und Rühlmann aufgestellten Hypothese sollten sich die dunklen Stellen in ganz ähnlicher Weise bilden, wie der dunkle Raum zwischen dem Anoden- und Kathodenlicht. Werden die Gasmolecüle mit einer so grossen Geschwindigkeit z. B. von der positiven Elektrode fortgeführt, dass sie dabei leuchten, so verlieren sie beim Auftreffen auf die davor liegende, ruhende Gasschicht ihre Geschwindigkeit und ihre Leuchtkraft. Zugleich werden aber in jener Gasschicht die Elektricitäten vertheilt, die negativen Gastheilchen gleichen ihre Elektricität mit der der ankommenden positiven Theilchen aus, die positiven bewegen sich mit grosser Geschwindigkeit und bis zum Leuchten erhitzt weiter zur nächsten ruhenden Gasschicht u. s. f. Zwischen den in entgegengesetzter Richtung sich bewegenden, positiven und negativen Theilchen jeder Gasschicht ist eine Stelle der Röhre, wo das Gas nicht leuchtet. Dasselbe findet an der negativen Elektrode statt, wo sich gleichfalls helle und dunkle Schichten zeigen. Da wo die langsamer bewegten und daher weniger hellglühenden Gasmolecüle der negativen Entladung von den schneller bewegten, helleren, positiven getroffen werden, also in der Nähe der negativen Elektrode, findet ein ganz ähnliches Verhältniss statt. Die den geladenen Luftschichten innewohnenden Bewegungen heben sich gegenseitig auf und der dunkle Raum entsteht. Da in diesem die Elektricität sich nicht mehr bewegt, so beobachtet man auch bei den Ver-

---

[1]) Reitlinger u. Zerjau, Sitzungsber. d. Wien. Akad. 46, p. 352, 1862*; ähnlich Neyreneuf, Ann. de Chim. et de Phys. [5] 8, p. 511, 1876*; Compt. rend. 80, p. 118*. — [2]) van der Willigen, Mededeel. d. Acad. te Amsterdam, 15, p. 389, 1863*; Fortschritte d. Phys. 1864, p. 495*.

suchen von de la Rive daselbst keine derivirten Ströme. Mit zunehmender Geschwindigkeit der von den Elektroden fortgeführten Elektricitätsmengen müssen die Schichten nach dieser Erklärung immer enger werden, bis bei sehr grossen Dichtigkeiten der Luft die positive Entladung die Theilchen bis auf sehr weite Strecken ohne Schichtenbildung fortführt.

762 Gegen diese Ansicht spricht indess wiederum der §. 754 angeführte Versuch Wheatstone's, nach welchem das Bild einer langen Entladungsröhre in einem Spiegel, welcher um eine ihrer Axe parallele Axe rotirt, nicht nach dem einen Ende hin seitlich verschoben ist. Erfolgte die Entladung und Schichtenbildung durch einen mechanischen Anstoss von den Elektroden aus, so könnte er nur mit der Geschwindigkeit des Schalls fortschreiten und die einzelnen Schichten müssten im Spiegel im Sinne der Rotationsrichtung von der Elektrode an immer mehr verschoben sein [1]).

763 Zur Erklärung der Vorgänge an der Kathode nahm Crookes [2]), ähnlich wie Rühlmann und ich für diejenigen an der Anode und Kathode, an, dass die Elektrisirung der Kathode, z. B. einer Metallplatte, eine moleculare Störung an ihrer Oberfläche und der Gasschicht daran verursacht, welche sich mit wachsender Verdünnung immer weiter verbreitet und die dunkle Kathodenschicht darstellt. Die Dicke derselben soll der mittleren Weglänge der Molecüle gleich sein; die von der Elektrode schnell fortfliegenden Molecüle sollen die gegen sie hinfliegenden zurückhalten und mit ihnen an dem leuchtenden Rande der dunklen Schicht zusammentreffen.

Ist die Verdünnung so weit gediehen, dass die dunkle Kathodenschicht die Glaswand berührt, so verlieren die Theilchen daselbst einen Theil ihrer Energie und Licht wird erzeugt. Die Schatten sind also durch die Abwesenheit des Anstosses der Molecüle erzeugt, sie sind „molecular". Bei grosser Verdünnung sollen, da die mittleren Weglängen immer grösser werden, die Molecüle fast ausschliesslich direct von Elektrode zu Wand oder von Wand zu Wand fliegen und so die den gasförmigen Zustand bedingenden Eigenschaften immer mehr zurücktreten, die Materie soll so in einen vierten Aggregatzustand, den ultragasförmigen oder molecularen gelangen [3]).

Dass die gegen einen Brennpunkt von einer concaven negativen Elektrode convergirenden Kathodenstrahlen bei starker Verdünnung wieder etwas aus einander weichen, der Brennpunkt sich nach vorn ver-

---

[1]) Vgl. Eilhard Wiedemann, l. c. §. 754. — [2]) Vgl. auch Crookes, Phil. Trans. 1879, pt. 1, p. 135* und Planté, Recherches 2 [2], p. 41, 1879*; Beibl. 4, p. 809*. — [3]) Mit Recht wendet Eilhard Wiedemann (Ladenburg's Handwörterbuch der Chemie, 1, p. 138, 1882) gegen diese Annahme ein, dass der Aggregatzustand eines Körpers nie direct von den Dimensionen des Gefässes abhängen kann, sondern nur von den Eigenschaften der Molecüle selbst bedingt ist.

schiebt, glaubt Crookes auf eine Abstossung der negativ elektrisirten, von der Elektrode in normaler Richtung fortfliegenden Theilchen zurückführen zu können.

Dass im dunklen Raume nur bei grossen Verdünnungen das Glas phosphorescirt, soll darin begründet sein, dass erst dann die Theilchen in demselben die genügende Geschwindigkeit besitzen, um die Phosphorescenz zu erregen.

Die Bildung des Halbschattens soll davon herrühren, dass das sich stets positiv ladende Diaphragma die negativen Molecüle anzieht und festhält; die an seinen Kanten vorbeigehenden einwärts zieht, so dass sie den Schatten bilden, welcher etwas kleiner ist, als der Ausbreitung der Strahlen entspricht. Wird das Diaphragma abgeleitet oder negativ elektrisirt, so werden die Molecüle weniger stark angezogen oder abgestossen, divergiren also um den schattenwerfenden Körper stärker und so entsteht ein Halbschatten.

Da mit steigender Verdünnung die Molecüle schneller von der negativen Elektrode fortfliegen sollen, da sie weniger Anstösse auf ihrem Wege erleiden, so sollen sie deshalb von dem abgeleiteten oder negativ geladenen Metallschirm weniger abgelenkt werden, wodurch der Halbschatten kleiner wird.

764 Moulton und Spottiswoode[1]) nehmen ebenfalls an, dass eine Art elektrischer Wind von sehr schnell fortgetriebenen Molecülen beim Auftreffen auf die Wände Phosphorescenz verursacht. Mit der Weglänge der Molecüle bringen sie indess die Erscheinung nicht in Beziehung, da sie schon bei Drucken von bis etwa 10 mm auftrete. Dass die Phosphorescenz bei stärkeren Verdünnungen sich weiter ausbreitet, schieben sie auf den Widerstand des Gases gegen die fortgetriebenen Molecüle. Da auch die von abgeleiteten Stellen der Glaswände kommenden Kathodenstrahlen Phosphorescenz erregen, so soll die Grenzschicht von Gas daselbst fortgeschleudert werden. Auch aus der „Interferenz" (vergleiche §. 652) der schräg oder normal zusammentreffenden Kathodenstrahlen, welche theils von der primären Kathode, theils von einer secundären, durch Ableitung der Röhrenwand gebildeten ausgehen, leiten sie ab, dass Molecularströme von denselben austreten. — Den dunklen Raum erklären sie als eine Stelle, wo die Elektricitäten ohne Leuchten hindurchgehen können.

Sie stellen auch nach dem Auftreten der secundären Kathodenstrahlen, ihrer Interferenz mit der primären, namentlich auch beim Auflegen zweier verbundener Stanniolringe, Betrachtungen über den zeitlichen Verlauf der Entladungen an, wegen deren wir auf die Originalabhandlung verweisen müssen. — Wegen der Complicirtheit der Verhältnisse, der Dauer jeder Entladung nach Beginn derselben, der Zeitdauer der dielektrischen

---

[1]) Moulton und Spottiswoode, Phil. Trans. 1880, 2, p. 580*.

Polarisirung des Glases, der verschieden schnell an beiden Elektroden erreichten, zur Entladung erforderlichen Potentialniveaux können die Schlüsse doch noch keine definitiven sein.

Diesen Theorien haben sich mit einigen Abweichungen auch andere Physiker angeschlossen [1]).

765 Zunächst lässt sich indess speciell gegen die von Crookes den früheren Hypothesen beigefügte Annahme, dass die elektrischen Molecüle ohne Zusammenstoss in der dunklen Kathodenschicht fortgeschleudert werden und erst leuchten, wenn sie andere Molecüle in der hellen Grenzschicht stossen, einwenden, dass schon die erste die Kathode selbst umgebende Gasschicht leuchtet, unabhängig von der Theilnahme der Elektrode selbst, da sie nur das reine Gasspectrum zeigt. Sodann wird auch im dunklen Kathodenraume selbst Fluorescenz erzeugt. Endlich lässt sich nachweisen, dass die Dicke d der dunklen Schicht viel grösser ist, als die mittlere Weglänge der Molecüle in dem betreffenden Gase [2]), also auch nicht dem Drucke p umgekehrt proportional ist.

Nach Puluj [3]) ist in der That in einem cylindrischen Rohre mit plattenförmiger Kathode die Dicke d des dunklen Raumes bei verschiedenen Drucken p:

p	1,46	0,51	0,24	0,12	0,09	0,06 mm
d	2,5	5,8	9,5	15,5	19,5	2,20
pd	3,65	2,96	2,28	1,86	1,75	1,32

Für Luft ist bei $p = 0{,}06$ mm die mittlere Weglänge $l = 0{,}9$, bei $p = 1{,}46$ mm $l = 0{,}04$ mm, so dass keine Uebereinstimmung zwischen l und d vorhanden ist.

Ferner haben Warren de la Rue und Hugo Müller die dunkle Kathodenschicht photographirt; sie enthält also schon ultraviolette Strahlen. Auch durchziehen bei grossen Verdünnungen die Kathodenstrahlen den dunklen Raum.

766 Als Ursache der Kathodenstrahlen sieht Puluj [3]) die mit Elektricität geladenen, von der Elektrode fortgeschleuderten Metalltheilchen an, welche auf die Wandungen auftreffen, und weist durch die Art des Absatzes auf der Wand nach, dass diese fortgeschleuderten Theilchen ebenfalls durch den Magnet abgelenkt werden. Dass bei Aluminiumelektroden an der Wand sich kein Absatz zeigt, soll in Adhäsionsverhältnissen dieses Metalles am Glas seinen Grund haben (vergl. indess §. 695).

Die Phosphorescenz erklärt er, indem der von den Elektrodentheilchen bei der Entladung als Elektricität mitgeführte freie Aether mit dem

---

[1]) s. Gintl, Studien über Crookes' strahlende Materie. Prag, A. Hasse, 1880*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22, Jan. 1880, p. 117*; Wied. Ann. 11, p. 832, 1880*. — [3]) Puluj, Wien. Ber. 81 [2], p. 864, 1880*; Beibl. 4, p. 812*.

die getroffenen Körpermolecüle umgebenden zusammentrifft und ihn so zu Schwingungen veranlasst. — Die von Crookes beobachtete Abnahme der Phosphorescenz an einer längere Zeit von den Entladungen getroffenen Stelle soll darauf zurückzuführen sein, dass sich dieselbe mit einem metallischen Ueberzug von Elektrodenmaterie überzieht.

Aus seiner Anschauung über die Entladung erklärt Puluj die Ablenkung der Kathodenstrahlen durch den Magnet in der Weise, dass er die mit Elektricität beladenen fortfliegenden Theilchen als Elementarströme auffasst und auf sie das Laplace'sche Gesetz anwendet, wie dies auch schon früher zur Erklärung der von Plücker beobachteten Erscheinungen geschehen ist.

Die Bewegungserscheinungen an Radiometerflügeln, welche einer Kathode gegenüber gestellt werden, erklären sich nach ihm aus der Annahme der strahlenden Elektrodenmaterie.

Das Rotiren eines Radiometers mit einerseits aus Glimmer-, andererseits aus Aluminium bestehenden Flügeln mit der Aluminiumseite voran will er dadurch begründen, dass der Aetherstrom der Elektricität bei seinem Austritt aus der Elektrode diese gleichsam durch Reibung als Ganzes mit sich fortführt.

Auch die von Goldstein (vergl. §. 505 u. flgee.) untersuchten Phänomene bei Anwendung zweier Kathoden sucht er auch aus seiner Convectionstheorie zu erklären [1]).

Indess kann man nach Eilh. Wiedemann [2]) durchaus nicht annehmen, dass die Erwärmung der Glaswände durch die Kathodenstrahlen von dem Anprall der aus der Umgebung der Elektroden fortgeschleuderten Gasmassen herrühre [3]). Würde selbst eine 1 cm dicke Schicht des Gases fortgetrieben, so müsste sie eine Geschwindigkeit von 100000 m haben, um dieselbe hervorzurufen. Noch weniger können direct von der Elektrode fortgetriebene Metalltheilchen [4]) die Glaswände so stark erwärmen, wie man beobachtet hat. Da Aluminiumelektroden kaum zerstäubt werden, müsste die Geschwindigkeit der geringen Mengen der von ihnen losgerissenen Theilchen eine ganz enorme sein.

Gegen diese Hypothese spricht auch, dass nach den Versuchen von Wächter (§. 698) an gewissen Halbleitern als Kathoden (Holz u. s f. [nicht Chlor- und Jodblei, vergl. §. 700]) kein dunkler Raum und kein Glimmlicht entsteht, über siedendem Oel und ebenso über concentrirter Schwefelsäure beide sich bilden, aber im ersten Falle kein Absatz von Partikelchen auf der Glaswand zu erkennen ist. Demnach hält Wächter

---

1) Schuster führt die Entstehung der Kathodenstrahlen u. s. f. in einer während des Druckes erschienenen Arbeit (Nature, 30, p. 230, 1884*) auf eine Art Elektrolyse zurück. J. J. Thomson in einer ebenfalls erst während desselben publicirten Abhandlung (Phil. Mag. [5] 15, p. 427, 1883*; Beibl. 8, p. 924*) unter eventueller Herbeiziehung der Theorie der Wirbelringatome auf eine Dissociation der Molecüle. — 2) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. 10, p. 245, 1880*. — 3) Gintl, Studien über Crookes' strahlende Materie, Prag, Hasse, 1880*. — 4) Puluj, Wien. Anz. 1880, p. 76*.

dafür, dass der dunkle Raum und das Glimmlicht auf Dampfbildung und nicht auf Losreissung von festen Theilen beruhen.

Auch Voller[1]) betont, dass elektrisirte Materie, wenn der Strom nicht hindurchfliesst, im Allgemeinen nicht vom Magnet beeinflusst wird, wohl aber elektrostatischen Anziehungen folgen müsste, während die Kathodenstrahlen wohl vom Magnet, nicht aber von elektrischen Körpern abgelenkt werden.

Ferner brachte Goldstein[2]) in ein Entladungsrohr zwei auf einander senkrechte Metallplatten und stellte dasselbe vor einen stark dispergirenden Spectralapparat, so dass die eine Platte senkrecht gegen die Axe des Collimatorfernrohres stand. Benutzte er die eine oder andere Platte als Kathode, so trat doch bei Vertauschung derselben keine Verschiebung der Spectrallinien ein, wie sie sich hätte zeigen müssen, wenn die Kathodenstrahlen in einer Fortschleuderung von Gastheilchen mit grosser Geschwindigkeit bestanden hätten. Jedenfalls könnte dieselbe nicht grösser als 14 Meilen pro Secunde sein.

767

Eine andere Ansicht hat Goldstein[3]) aufgestellt. Da das Kathodenlicht die positive Entladung völlig durchziehen kann und sich fast unabhängig von ihr ausbreitet, so müsste in höchst eigenthümlicher Weise eine Ausgleichung der Elektricitäten beider Entladungen an den Glaswänden oder sonst wie stattfinden. Noch mehr tritt diese Anomalie in dem Apparate Fig. 237 hervor, in welchem sich bei gehöriger Verdünnung die Kathodenstrahlen von *k* aus bis weit in den Raum *B* durch *c* erstrecken und bei *c* secundäres negatives Licht erscheint. Dabei müsste die negative Elektricität also von *k* bis zum Ende der Kathodenstrahlen in *B*, dann zurück zu *c* und mit dem secundären Büschel vorwärts gegen *a*, dann aber wieder rückwärts bis zum Ende der von *a* in das negative Licht eindringenden positiven Entladung fliessen.

Fig. 237.

k − A c B a +

Deshalb nimmt Goldstein an, dass jedes Kathodenlicht, jedes Büschel secundären Lichtes und jede einzelne Schicht des positiven Lichtes einen besonderen, von der Kathodenseite beginnenden und am Ende der Kathodenstrahlen resp. Schichten endigenden Elektricitätsstrom darstellt, ohne dass die Elektricität dabei von dem einen Gebilde zum anderen übergeht. Es gebe also ebenso viel Ausgangspunkte der Entladung, als secundäre negative Büschel und Schichten vorhanden sind.

---

[1]) Voller, Ueber die Nichtexistenz strahlender Materie in den Crookes'schen Röhren. Verh. d. naturw. Vereins Hamburg-Altona 1880*; Carl, Zschr. f. Elektr. 2, p. 384, 400, 420*; Beibl. 4, p. 900*. — [2]) Goldstein, Berl. Monatsber. 22. Jan. 1880, p. 120*; Wied. Ann. 11, p. 831, 1880*. — [3]) Goldstein, l. c.

Hiermit ist indess kaum zu vereinen, dass eine bestimmte Quantität Elektricität durch ein Entladungsrohr bei einseitig gerichteten Entladungen wirklich hindurchgeht, wenn das eine Ende mit einer Elektricitätsquelle verbunden, das andere abgeleitet wird, wo also bei gehöriger Länge factisch von der ersten Seite die Elektricität in das Rohr eintritt, wie durch ein Galvanometer nachgewiesen werden kann. Strömt die Elektricität vom einen Ende eines Gebildes nur zum anderen Ende desselben, so muss sie entweder verloren gehen, oder zum Ausgangspunkte zurückfliessen; sonst würde sie sich anstauen; in beiden Fällen könnte keine Elektricität durch die Ableitung des Rohres hindurchgehen.

768 Da die vorstehenden Ansichten über die Natur der Entladung hiernach meist nicht aufrecht zu erhalten sind, hat man sich anderen Anschauungen zuwenden müssen, welche auf die Vorstellung begründet sind, dass die Elektricitätserscheinungen auf einer Bewegung des Aethers beruhen.

Schon im Jahre 1797 hat Gren[1]) die nahe Beziehung der Lichtmaterie mit der Elektricität namentlich aus dem Auftreten des elektrischen Lichtes im Torricelli'schen Vacuum gefolgert. — Neuerdings hat auch Goldstein[2]) die Entladung auf den Lichtäther bezogen und in Betreff der Leitung des Vacuums discutirt[3]). Ebenso hat Edlund[4]) dieselbe Anschauung in Anschluss an seine im Jahre 1872 aufgestellte allgemeine Aethertheorie besprochen.

769 Wir haben §. 541 u. f. und 647 gesehen, dass an einer negativen Metallelektrode ein grosser Widerstand auftritt, an secundären, durch Ableitung einer Stelle der Röhrenwand des Entladungsapparates erzeugten Elektroden aber nicht. Worauf dieser Unterschied beruht, lässt sich noch nicht übersehen.

Die Arbeitsleistung bei Ueberwindung des der Entladung entgegenstehenden Widerstandes an den Elektroden addirt sich zu der Arbeitsleistung an jeder Stelle des Entladungsrohres, welche als Wärme erscheint. Wird dieselbe auch erst secundär durch Uebertragung der Aetherbewegung auf die Molecüle erzeugt, so kann man sie doch, wenn man will, als einen gewissen Widerstand der Entladung bezeichnen, welcher cet. par. der Länge l des Rohres proportional ist. Man kann demnach die ganze Arbeitsleistung im Rohre gleich $R = a + b\,l$ setzen, wo a und b Constante sind. Wird das Gas verdünnt, so nimmt erst die Potentialdifferenz für eine Entladung ab, dann wieder zu. Berücksichtigt man die dabei sehr stark zunehmende Erwärmung, namentlich der negativen Elektrode,

[1]) Gren, Grundriss der Naturlehre, Halle 1797, §. 1408*; Gehler's Wörterbuch 3, p. 367*. — [2]) Goldstein, Eine neue Art elektrischer Abstossung, Berlin p. 189*. — [3]) Goldstein, Wied. Ann. 12, p. 256, 1881*. — [4]) Edlund, Wied. Ann. 15, p. 514, 1882*. Des Zusammenhanges wegen besprechen wir diese Theorien in Betreff der Entladungen schon hier. Im Schlusscapitel werden wir auf die allgemeineren Aethertheorien der Elektricität zurückkommen.

so wird man annehmen können, dass der noch näher zu definirende Uebergangswiderstand an den Elektroden mit wachsender Verdünnung immer mehr wächst.

770 Ueber das Wesen des Uebergangswiderstandes (*a* in der Formel des vorigen Paragraphen) haben wir schon §. 753 Einiges gesagt; derselbe kann darauf beruhen, dass die auf den Elektroden condensirte Gasschicht durchbrochen wird, auch kann er in der Differenz der dielektrischen Polarisirbarkeit des Stoffes der Elektrode und des Gasmediums begründet sein. — Man hat ihn auch wohl durch eine elektrische Gegenkraft und eine Polarisation der Elektroden zu erklären versucht.

Warren de la Rue und H. Müller [1]) verbanden indess die Elektroden einer Entladungsröhre mit den Polen einer grossen galvanischen Säule und erreichten es durch eine relativ kleine Anzahl der Elemente oder genügend grossen Abstand der Elektroden, dass der Strom die Entladungsröhre nicht durchsetzte. Wurde plötzlich die Säule ausgeschaltet und wurden dafür die Elektroden mit einem Galvanometer verbunden, so war der Ausschlag immer grösser, als wenn der Strom wirklich durch die Röhre gegangen war. Bei einer wirklichen Polarisation, welche doch erst nach dem Durchgange des Stromes hätte eintreten können, müsste sich gerade das entgegengesetzte Verhalten zeigen. Die Galvanometerausschläge rühren also ausschliesslich von der elektrostatischen Ladung der Elektroden und der umgebenden Glaswände her.

Eine etwa zu überwindende elektromotorische Gegenkraft, wie bei dem Peltier'schen Phänomen, haben Naccari und Bellati ebenfalls nicht beobachten können (§. 961).

771 Bei der Existenz dieses grossen Uebergangswiderstandes, welcher mit wachsender Verdünnung wächst, kann man nicht aus der Zunahme des Widerstandes eines Entladungsapparates, resp. der zu seiner Durchbrechung erforderlichen Potentialdifferenz mit der Verdünnung auf ein gleichzeitiges Ansteigen des Widerstandes des Gases selbst Schlüsse ziehen. Vielmehr wäre es nach Edlund möglich, dass ganz verdünnte Räume sehr gut leiteten. Schon die geringe Erwärmung in den positiven Entladungen in ganz verdünnten Räumen deutet nach Eilhard Wiedemann darauf hin.

Hiernach könnte man annehmen, dass das absolute Vacuum, in welchem nur allein die Aetherbewegung den Elektricitätsgang vermitteln kann, ein sehr guter Leiter wäre. Eine directe experimentelle Entscheidung ist hierfür nicht zu treffen, da kein absolut leerer Raum herzustellen ist.

---

[1]) Warren de la Rue u. H. Müller, Proc. Roy. Soc. 30, p. 563, 1880*; Beibl. 4, p. 741*.

Wäre indess der Widerstand des absolut leeren Raumes verschwindend klein, so sollte er vom Abstande der Elektroden unabhängig nur dem Uebergangswiderstande an denselben zuzuschreiben sein. Ist der letztere so gross, dass bei einem grossen Abstande der Elektroden in einer Entladungsröhre bei starker Verdünnung kein Strom durchgeht, so müsste er auch bei Annäherung der Elektroden an einander nicht hindurchfliessen; indess zeigt sich nach Krajewitsch[1]) bei einer Röhre mit drei Elektroden *abc* im Abstande von 205 und 125 mm, dass wenn durch die Endelektroden *a* und *c* kein Strom geht, ein solcher durch *ab* oder *bc* fliesst und die Röhre leuchtet.

772 Eine die verschiedenen Erscheinungen der Entladung umfassende Theorie war auf die Zuhülfenahme der Aetherbewegung noch nicht basirt worden. Eine solche gewann einen bestimmten Stützpunkt durch die Beobachtung von Eilh. Wiedemann, dass die verdünnten Gase beim Durchgange des Stromes ohne wesentliche Temperaturerhöhung leuchten können, also durch denselben eine Aetherbewegung ohne vorherige primäre Wärmebewegung der Molecüle verursacht werden kann. In Folge dessen hat derselbe[2]) die folgende Theorie aufgestellt.

Die Elektricität sammelt sich auf der Oberfläche der Elektroden und erzeugt in dem umgebenden Medium, wie schon Faraday[3]) angenommen hatte, eine dielektrische Polarisation unter Deformation der Aetherhüllen, während die Molecüle die Orientirung ihrer Rotation beibehalten. Erst bei einer bestimmten Dichte geht die Elektricität über und die plötzliche Aenderung der sich in longitudinalen Wellen fortpflanzenden dielektrischen Polarisation bedingt Oscillationen der Aetherhüllen. Daneben kann Elektricität (freier Aether) von Molecül zu Molecül übertreten.

Hierbei ist die lebendige Kraft der Oscillationen der Aetherhüllen, ganz analog wie bei der Phosphorescenz und Fluorescenz, grösser, als der Wärmebewegung bei der betreffenden Temperatur des Körpers entspricht. Dies zeigt die niedere Temperatur der Gase bei der Entladung. Erst secundär überträgt sich die Aetherbewegung auf die Körpermolecüle[4]),

---

[1]) Krajewitsch, Rep. d. Phys. **19**, p. 118, 1883*; Beibl. **8**, p. 605*. — [2]) Eilh. Wiedemann, Wied. Ann. **9**, p. 160, 1880*, **10**, p. 245, 1880*, **20**, p. 778 u. f., 1883*. — [3]) Faraday, Exp. Res. Ser. **12**, §. 1370 u. f., 1838*. — Dass dem Durchgange einer Entladung durch ein Dielektricum eine elektrische Polarisation der Molecüle vorangeht, welche ein bestimmtes, von der Natur und der Dichtigkeit des betreffenden Körpers abhängiges Maximum nicht überschreiten kann, dann durch eine von Licht- und Wärmeentwickelung oder chemischer Action begleitete Bewegungserscheinung nach unbekannter Natur ausgeglichen und übertragen wird und dem entsprechend auch die unter Ozonbildung stattfindende Lichterscheinung zwischen zwei innen mit Stanniol belegten Glas- oder Glimmerplatten beim Laden und Entladen der Belegungen zunächst in Gasen von gewöhnlicher Dichtigkeit erst bei einer ganz bestimmten Ladung beginnt, ist bereits im Jahre 1857 von Werner Siemens (Pogg. Ann. **102**, p. 117*) angegeben worden. — [4]) Ganz ähnliche Betrachtungen hat Goldstein wiederholt angestellt, Wied. Ann. **12**, p. 265, 1881*.

welche dadurch oscilliren und durch ihre wechselseitigen Anstösse in translatorische Bewegung gerathen, bis das der betreffenden Temperatur entsprechende Verhältniss erreicht ist. Diese Umwandlung geht sehr schnell vor sich. Werden die Schwingungen der Molecüle sehr gross, so dissociiren sie sich in ihre Atome, wie z. B. auch Chlorsilber durch auftreffendes Licht. Die dazu erforderliche Energie wird den Molecülen unabhängig von der Temperaturerhöhung durch die Elektricität zugeführt und erscheint bei der Wiedervereinigung der Gase als Wärme, z. B. in einem die Entladungsröhre umgebenden Calorimeter. Dabei könnte ein erster Bruchtheil zur Erhöhung der mittleren Temperatur verwendet werden, wodurch die Atome gelockert werden, ehe die Dissociation eintritt.

Fasst man die positive Entladung als eine Welle von longitudinalen Schwingungen auf, so erklärt es sich auch, dass sich die Verhältnisse in derselben ganz analog denen der Fortpflanzung eines Lichtstrahles in einem schwach absorbirenden Medium gestalten. In der That lässt sich in beiden Gebieten eine Anzahl von Analogien auffinden.

1) Ein conisch sich erweiternder Lichtstrahl erzeugt in jedem Querschnitt nahe die gleiche Wärmemenge; ebenso eine elektrische Entladung in Röhren von verschiedenem Querschnitt.

2) Mit wachsender Intensität des Lichtstrahles und entsprechend abnehmender Zeit des Durchganges bleibt die erzeugte Wärmemenge die gleiche. Ebenso bei wachsender Stärke der elektrischen Entladungen und abnehmender Zahl derselben.

3) Mit zunehmender Absorption des Lichtes, etwa durch Vermehrung der Zahl der absorbirenden Theile in einer Lösung nimmt die entwickelte Wärmemenge zu; ebenso bei der Entladung mit zunehmendem Druck des Gases, also wachsender Zahl der durchflossenen Theilchen.

Als secundäre Einflüsse wirken bei der Gasentladung Ladungen der Glaswand.

773 Die Schichtenbildung wird ebenfalls auf die longitudinale dielektrische Polarisation von der Anode aus zurückgeführt, welche sich bei dem Uebergang der Elektricität ändert. Diese Aenderung pflanzt sich fort und ihr folgt ein Strom freier Elektricität. Die übrigens nicht etwa mit der Geschwindigkeit des Schalls sich fortpflanzende dielektrische Polarisation wird, wie jede Spannung, an der hellen Kathodenschicht reflectirt und dadurch entstehen Interferenzen, wodurch die nachströmende Elektricität Stellen minimaler und maximaler Bewegung findet, an denen sie sich verschieden verhält. Der dunkle Raum zwischen dem Anoden- und Kathodenlicht entspricht der ersten Interferenzstelle bei der Reflexion. An der Anode selbst ist ein Bewegungsmaximum; daselbst liegt eine Schicht, ein leuchtender Punkt, selbst wenn bei grosser Annäherung an die Kathode sonst keine Schichten auftreten. Da die Reflexion nicht an einer unendlich dünnen Schicht stattfindet, so sind auch die Stellen maximaler Bewegung und die Schichten nicht unendlich dünn, sondern um so breiter,

je dicker jene reflectirende Kathodenschicht ist, also bei grösserer Verdünnung; ebenso verhält es sich mit dem dunklen Trennungsraum.

Sind die der Anode zugeführten Elektricitätsmengen zu gross oder erfolgt die Ladung zu plötzlich, so sind die Bewegungen unregelmässig und die Schichten und der dunkle Raum bilden sich nicht aus.

Ist die Anode abgeleitet, die Kathode allein mit der negativen Elektricitätsquelle verbunden, so entsteht auch an letzterer von der sie umgebenden hellen Kathodenschicht aus eine dielektrische Polarisation. Wegen des grossen Widerstandes in der dunklen Kathodenschicht gleicht sich aber nicht sogleich die Elektricität nach der negativen Elektrode aus, sondern die dielektrische Polarisation schreitet bis zur positiven Elektrode fort, wo nun der Vorgang wie oben ist. Die Schichten bilden sich dann wegen der geringeren Mengen der abfliessenden positiven Elektricität an der Anode auch regelmässiger aus, als wenn der letzteren von der Elektricitätsquelle stets neue Elektricitätsmengen zufliessen.

774 Die Ablenkung der positiven Lichtsäule an einer von aussen abgeleiteten Stelle des Entladungsrohres ist nach Eilhard Wiedemann von zwei Bedingungen abhängig: einmal von der veränderten Vertheilung der Elektricität auf der Wand, wodurch das Potential daselbst erniedrigt wird und sich die Entladung gegen die betreffenden Stellen hinzieht, was namentlich bei hohen Drucken eintritt; zweitens, namentlich bei niederen Drucken, von der Bildung eines dunklen Kathodenraumes, indem die der berührten Stelle innerhalb des Rohres gegenüberliegende Wand als secundäre Kathode dient. Da dieser Raum dem Uebergange der positiven Elektricität einen sehr grossen Widerstand darbietet (vergl. §. 543), so biegt sich die positive Entladung von der berührten Stelle ab.

Von der Ausbildung der dunklen Räume unter abgeleiteten Stellen rührt auch die starke Erwärmung eines mit gutleitenden, abgeleiteten Flüssigkeiten gefüllten und die Entladungsröhre umgebenden Calorimeters her. — Da die gebundenen Elektricitätsmengen bei Einschaltung von Funkenstrecken wachsen, bildet sich dabei auch der dunkle Kathodenraum stärker aus, die Widerstände und Erwärmungen werden dadurch besonders gross.

775 Ueber die Natur der Kathodenstrahlen stellt ferner Eilhard Wiedemann die folgende Hypothese auf.

Nach seinen Versuchen (§. 497) ändert ein in den Weg der Kathodenstrahlen gestelltes Glimmerblatt die Stromstärke in dem Schliessungskreise nicht wesentlich, auch lenken nach Hertz (§. 718) die Kathodenstrahlen nicht einen Magnet ab und fallen nicht mit den Stromlinien zusammen. Sie haben also direct mit der Stromleitung nichts zu thun. Deshalb werden die Kathodenstrahlen als Lichtstrahlen mit transversaler Schwingungsrichtung und sehr kleiner Schwingungsdauer angesehen.

Nach Goldstein, sowie nach Moulton und Spottiswoode (§. 656 u. 657) werden die von der aussen abgeleiteten Wand einer Entladungsröhre ausgehenden Kathodenstrahlen durch die Schichten des positiven Lichtes ausgelöscht, wobei letztere Schatten entwerfen. Nach §. 762 können die Schichten nicht durch Anhäufung von Materie bedingt sein. Ist die positive Entladung, wie anzunehmen, eine Folge dielektrischer Polarisation von der Anode aus, der ein Strom positiver Elektricität folgt, so kann darin die Bewegung nur longitudinal sein. Die Schwingungsrichtung der secundären Kathodenstrahlen kann daher, damit sie mit jener Bewegung interferirt und die Strahlen ausgelöscht werden, nur transversal sein.

Lichtstrahlen werden offenbar um so leichter absorbirt, je grösser die Zahl ihrer Schwingungen auf einer gewissen Strecke ist, da dann eine Coincidenz mit den Schwingungen der getroffenen Körpermolecüle um so öfter eintritt; eine solche Absorption der Kathodenstrahlen zeigt sich schon an den äussersten Oberflächen der Körper. Gehen die Kathodenstrahlen durch Gasmolecüle, so gerathen deren Aetherhüllen in Schwingungen und senden Licht aus; ebenso geschieht es bei den festen phosphorescenzfähigen Körpern. Die Kathodenstrahlen besitzen eine grosse Bewegungsenergie, welche sie an die Körpermolecüle abgeben können; deshalb zeigt z. B. der Wasserstoff, durch welchen sie hindurchgehen, unter Dissociation seiner Molecüle das Linienspectrum, und werden die in ihren Weg gestellten Körper leicht glühend.

Am Ausgangspunkte der Kathodenstrahlen, sei es primärer oder secundärer, wird eventuell ein heller Schein von Natriumlicht oder die rothe Linie des Wasserstoffs gesehen, während in den Kathodenstrahlen die blauen Theile des Spectrums überwiegen. Dies dürfte von Aetherbewegungen an der Endfläche der Elektroden herrühren, welche sich auf die Molecüle derselben übertragen, wodurch secundär Dissociationen und Temperaturerhöhungen eintreten. Bei der grossen Zahl der Molecüle der Kathode im Verhältniss zu der im Rohr vertheilt sich an ersterer die Energie über eine grössere Zahl der Molecüle, weshalb daselbst mehr rothe Strahlen auftreten.

776 Die von Eilhard Wiedemann gefundene und von Goldstein als Reflexion der Kathodenstrahlen erklärte Rückstrahlung der Kathodenstrahlen von den Wänden entspricht ihrer Natur als Lichtstrahlen. Die von Goldstein beobachtete Deflexion ist ganz analog der Abbiegung eines Lichtstrahles an der Oberfläche eines Körpers, welcher von einer Atmosphäre von abnehmender Dichtigkeit resp. veränderlicher Spannung umgeben ist. Dieser veränderliche Zustand folgt aus dem grossen Widerstande gegen die positive Entladung in der Nähe der Kathode.

Die gegenseitige Abstossung zweier Kathodenstrahlen, welche bei starken Entladungen eintritt, wenn die Strahlen einen kleinen Winkel unter einander bilden, lässt sich aus dem auf die Vorderfläche einer Lichtwelle ausgeübten Drucke ableiten.

Sind durch diese Theorie auch noch nicht alle Punkte erledigt, so giebt sie doch unter einem einheitlichen Gesichtspunkte die hauptsächlichsten Erscheinungen wieder. Weiteren Untersuchungen bleibt es vorbehalten, sie zu prüfen, eventuell ihr die noch nicht genauer behandelten Erscheinungen unterzuordnen.

777 An die vorhergehenden Beobachtungen schliesst sich unmittelbar die schon früher berührte Frage, ob die verdünnten Gase noch in anderer Weise als bei den diruptiven Entladungen, also etwa ähnlich wie die festen oder flüssigen Körper leiten können.

Dass auch der continuirliche Durchgang der Elektricität durch die Gase durchaus von dem durch leitende feste und flüssige Körper verschieden ist, haben wir schon §. 626 u. flgde. erwähnt. Von vornherein besteht der fundamentale Unterschied, dass bei langsamer Elektricitätszufuhr die Elektricität die leitenden festen und flüssigen Körper in gleichmässigem Strom in demselben Maasse durchfliesst, wie sie den in ihnen befindlichen Elektroden zugeführt wird; in den Gasen, wie bei Nichtleitern, aber eine endliche Spannung an den Elektroden erzielt werden muss, ehe eine momentane Entladung durch sie hindurchgeht. Von den Nichtleitern unterscheiden sich die Gase dadurch, dass sie nicht nur bei genügender Ladung der Elektroden, wie erstere, unter Zerstörung ihrer Continuität von einem Funken durchbrochen werden, sondern ihre ganze Masse (bei hinlänglich kleinem Druck) an der instantanen Entladung theilnimmt.

Wie in jenen Körpern dürften bei der Ladung der Elektroden die Molecüle der Gase eine dielektrische Polarisation erfahren (vergl. §. 768). Während aber in den Nichtleitern neben der allmählich sich bis zum Durchbruch in Funkenform steigernden Elektricitätsansammlung an den Elektroden ein langsamer Durchgang der Elektricitäten durch Austausch der in den Molecülen vertheilten Elektricitäten zu beobachten ist, ist in den Gasen vor der instantanen Entladung kein solcher wahrzunehmen.

Mit diesem Vorgange bei langsamer Elektricitätszufuhr stimmen auch die Gesetze der Erwärmungen der Gase bei den Entladungen. Da zu jeder Entladung den Elektroden das gleiche Potential, also auch die gleiche Ladung mit Elektricität ertheilt werden muss, unabhängig davon, ob zwischen den dieselben umgebenden Räumen verschieden lange oder weite Verbindungsröhren eingeschaltet sind (abgesehen von Nebenumständen), so muss auch die Gesammterwärmung in letzteren von ihren Dimensionen unabhängig und der in der Zeiteinheit hindurchgegangenen Elektricitätsmenge proportional sein, wie die Versuche ergeben.

Wenn auch bei sehr schneller Elektricitätszufuhr die discontinuirlichen Entladungen in continuirliche übergehen (§. 624), so ist doch auch hier stets eine sehr erhebliche Potentialdifferenz erforderlich, um die Entladung einzuleiten. Auch nachher ist das Verhalten ganz in Uebereinstimmung

stimmung mit dem bei discontinuirlichen Entladungen, indem der scheinbare Widerstand der Entladungsröhren der Intensität des durchgehenden Stromes umgekehrt proportional ist, d. h. die Potentialdifferenz an den Elektroden bei verschiedenen Intensitäten constant bleibt. Dann fliesst aber jeder Ueberschuss der Elektricität nach einmal eingeleiteter Entladung sofort ab. Auch ist noch nicht mit Sicherheit erwiesen, dass ein Gas beim Durchgange des Stromes, z. B. für transversale Ströme leitender wird (§. 635). — Denken wir der Einfachheit halber nur die eine Elektrode mit der Elektricitätsquelle verbunden, die andere abgeleitet, so ist das Verhalten bei der Entladung etwa analog dem eines Gefässes, welches so balancirt ist, dass es bei einer gewissen Füllung mit Wasser durch ein seitliches Zuflussrohr umkippt. Wird das Wasser langsam zugeführt, so entleert sich dabei das Gefäss, richtet sich wieder auf und erst nach einiger Zeit beginnt das Spiel von Neuem. Bei genügend starker Zufuhr bleibt aber das Gefäss in der geneigten Lage und das zuströmende Wasser fliesst sofort continuirlich wieder ab.

778 Abweichend von den früheren Erklärungen sucht Mach und mit ihm Doubrava[1]) die Ursache des verschiedenen Verhaltens der positiven und negativen Elektricität in anderen Gründen; welche namentlich aus folgenden Versuchen abgeleitet werden.

Die beweglichen Theile eines Elektrometers werden mit einer leitenden Hülle umgeben. Erstere werden mit der äusseren, letztere mit der inneren Belegung einer Leydener Flasche verbunden und die Belegungen werden durch ein Funkenmikrometer in Verbindung gesetzt. Dann ist bei gleicher Schlagweite der Ausschlag des Elektroskops vor der Entladung grösser, wenn die beweglichen Theile positiv geladen sind.

Danach soll das Elektroskop bei gleicher Niveaudifferenz zwischen der Hülle und den beweglichen Theilen grössere Ausschläge geben, wenn letztere positiv geladen sind.

Hierdurch wäre ein ganz neuer Unterschied beider Elektricitäten angenommen, indem die positiv elektrisirten Körper sich bei gleicher Ladung stärker abstiessen, als die negativen.

Da indess die mit den Kugeln des Mikrometers verbundenen Leitersysteme ungleich sind, so ist der Beginn der Entladung wesentlich durch den Zustand des kleineren, also mit den beweglichen Theilen des Elektroskops verbundenen bedingt. Dass die Entladung dieses letzteren durch die Luft erst bei stärkerer Ladung erfolgt, wenn es positiv elektrisirt ist, so erklärt sich dieses Verhalten unmittelbar aus den von mir §. 578 u. flgde. erhaltenen Resultaten.

Hiergegen scheint zu sprechen, dass wenn man das Elektrometer mit seiner Hülle ganz mit Terpentinöl oder mit Olivenöl füllt, im ersten

[1]) Mach und Doubrava, Wien. Ber. 80 [2], p. 331, 1879*; Wied. Ann. 9, p. 61, 1880*. Doubrava, Untersuchungen über die beiden elektr. Zustände, Prag 1881*.

Fall der Ausschlag der beweglichen Theile zwar ungeändert bleibt, wie in der Luft, im zweiten Fall aber umgekehrt bei positiver Ladung im Verhältniss von 3:4 kleiner ist, als bei negativer.

Verbindet man ferner die mit Leydener Flaschen verbundenen Elektroden der Influenzmaschine durch eine 6,8 m lange, 3 mm weite Wasserröhre, so ist die Röhre in der Mitte negativ geladen. Das Potential Null liegt etwa $1/2$ m gegen die positive Elektrode hin.

Hieraus und aus dem oben erwähnten Versuche wird geschlossen, dass zwischen zwei gleichen durch einen schlechten Leiter verbundenen, entgegengesetzt geladenen Körpern das mittlere Potentialniveau Null sich im Wasser gegen die positive, im Olivenöl gegen die negative Elektrode verschiebt.

Das verschiedene Verhalten der positiven und negativen Büschel unter verschiedenen Bedingungen, die später zu erwähnende ungleiche Ausbreitung der Lichtenbergischen Figuren, die Durchbohrung einer Karte zwischen zwei auf ihre entgegengesetzten Seiten neben einander aufgesetzten Spitzen an der negativen Elektrode (der Lullin'sche Versuch) sollen deshalb nach Doubrava alle auf einer ungleich schnellen Fortpflanzung beider Elektricitäten beruhen; nicht aber auf einer verschiedenen Leichtigkeit des Uebergangs der Elektricitäten in einen Isolator oder einem verschiedenen Uebergangswiderstand derselben an der positiven und negativen Elektrode, da sich sonst der Raum zwischen den Elektroden positiv oder negativ laden sollte.

Letzterer Einwand ist indess nicht bewiesen. Auch können bei den als Beweis für diese Ansicht herbeigezogenen Versuchen secundäre Umstände eine sehr wesentliche Rolle spielen. Bei dem erst erwähnten Versuche ist zu bedenken, dass das Olivenöl ein nicht ganz so schlechter Leiter ist, wie z. B. Terpentinöl. Wenn also dem für die Entladung wesentlich maassgebenden, kleineren, die beweglichen Theile des Elektroskops enthaltenden Leitersystem Elektricität zugeführt wird, so gleicht sich diese sowohl durch das Oel wie durch den Funken aus. In Folge dieser Ableitung bedarf es zur Bildung des Funkens einer stärkeren Elektricitätszufuhr als ohne dieselbe. Je besser die Ableitung ist, desto grösser muss dieselbe sein. Zugleich ist aber das Oel zersetzbar, an der positiven Elektrode scheiden sich die sehr schlecht leitenden fetten Säuren, an der negativen das besser leitende Glycerin aus. Damit erhält letztere eine grössere Capacität, bei gleichem Potential wird die an ihr aufgehäufte Elektricitätsmenge grösser.

Bei der Verbindung der Elektroden der Influenzmaschine durch eine feuchte Schnur werden beiden Elektroden der Maschine in gleichen Zeiten gleiche Elektricitätsmengen zugeführt. Da aber die positive Elektricität wegen der früher angeführten Gründe sich anderen Körpern durch die Luft in weiteren Entfernungen mittheilt, so kann schon hierdurch die Ausbreitung derselben in dem Wasserfaden vermindert sein.

Sind diese Einwände auch noch weiter zu prüfen, so zeigen sie doch, dass obige Verhältnisse nicht unbedingt auf specifischen primären Unterschieden zu beruhen brauchen.

Durch ähnliche secundäre Umstände kann es bedingt sein, dass auf einem mit Olivenöl getränkten Kartenblatt zwischen zwei Stanniolspitzen im Gegensatz zum Verhalten in Luft das negative Büschel lang und strahlig, das positive klein und sternförmig ist (siehe weiter unten). Es dürfte nicht nöthig sein, diesen Gegensatz durch das schwächere Gefälle der positiven Elektricität im Olivenöl zu begründen, welchem auch nach Doubrava[1]) die schwächere Ausbreitung des betreffenden Büschels entsprechen sollte, so dass die Büschel nicht den Vorgang an den Elektroden, sondern die Ausbreitung der Kraftlinien bezeichneten[2]).

---

[1]) Doubrava, Elektr. Zustände.

[2]) Auch eine Reihe anderer Versuche von Mach und von Doubrava dürften sich auf die von mir gegebenen Anschauungen zurückführen lassen. Wir wollen einige der hauptsächlichsten von ihnen der Wichtigkeit der neuen Hypothese halber anführen und in diesem Sinne näher erörtern.

Wird eine isolirte Flasche durch einen verschiebbaren Auslader und ein Riess'sches Luftthermometer entladen, während ihre Ladung durch ein mit ihrer inneren Belegung verbundenes Elektroskop gemessen wird, so ist bei gleicher negativer Ladung der Funken länger und die Wärmeentwickelung bedeutender, als bei positiver Ladung.

Wird umgekehrt die Flasche durch eine Funkenstrecke von constanter Länge und ein Luftthermometer entladen, so ist bei positiver Ladung der Flasche der Ausschlag des Elektroskops grösser, die Thermometerangabe dieselbe.

Sind beide Belegungen der Flasche isolirt, so kommt es nach meiner Ansicht auf die Gestalt und Grösse derselben, welche noch durch die Verbindung mit dem Elektrometer einseitig modificirt wird, sowie auf den Bindungscoefficienten der Flasche an, welche Belegung an der Ausgangsstelle des Funkens auf der Einheit der Oberfläche zuerst das zur Entladung erforderliche grössere positive oder kleinere negative Potential erreicht. Es lässt sich also nicht von vornherein sagen, ob die Ladung der einen oder anderen Belegung für die Entladungsverhältnisse maassgebend ist. Nach den früheren Erfahrungen muss, wenn die zuerst zur Entladung gelangende Belegung positiv ist, das dann erforderliche Potential grösser sein, also bei sonst gleichen Verhältnissen auch der Ausschlag des Elektroskops und die Wärme im Schliessungskreise, welche aber wiederum sich zwischen den, je nach den Umständen verschieden heissen Funken und der übrigen Leitung theilt. Auch wird bei negativer Ladung der kritischen Belegung und gleicher Angabe des Elektroskops die Entladung schon bei grösserem Abstande der Elektroden des Mikrometers eintreten, da dann das Potential durch Influenz nicht so weit gesteigert zu werden braucht, als bei positiver Ladung. Diese Versuche entscheiden also nicht gegen die frühere Theorie.

Vier Flaschen $ABCD$, Fig. 238, waren aussen abgeleitet, A positiv, C ebenso stark negativ geladen. Die Kugeln von B und D wurden denen von A und C so lange genähert, dass zwischen ihnen Funken übergingen, aber zwischen den von einander etwas entfernteren Kugeln von B und C nicht. Wurde A negativ, C positiv geladen, so sprang bei einer gewissen Niveaudifferenz der Funken zwischen B und C über. Also soll das Potentialniveau in der Luft durch die negative Ladung cet. par. an derselben Stelle grösser sein (Doubrava, elektrische Zustände).

Da es indess bei gleicher Ladung der Flaschen A und C eines grösseren Potentials zur Entladung der positiven Flasche A nach B, als der negativen Flasche C nach D bedarf, muss der Abstand $AB < CD$ sein. Bei umgekehr-

ter Ladung kann dann der positive Funken nicht mehr von C nach D übergehen, sondern er geht nach B.

Zwischen vier äquidistanten Kugeln, deren je zwei mit den inneren Belegungen zweier Leydener Flaschen A und B, Fig. 239, verbunden sind, wird

Fig. 238.

Fig. 239.

ferner eine mit dem Elektrometer verbundene Metallplatte C symmetrisch zu den Kugeln aufgestellt. Werden B und A abwechselnd entgegengesetzt geladen, so zeigt das Elektrometer negative Ladung.

Also soll das Potential, welches durch die negative Elektricität in der Platte hervorgebracht ist, absolut grösser sein, als das durch die positive Elektricität (Doubrava, l. c.).

Es wäre zu untersuchen, ob hierbei nicht direct negative Elektricität zur Platte überging, was je nach der Krümmung und Stellung der gegenüberliegenden Leiter eventuell leichter geschah, als der Uebergang der positiven Elektricität.

Eine Flasche wird ferner mit einem Elektrometer verbunden und zwischen zwei ebenfalls mit ihr verbundene Spitzen eine mit der inneren Belegung einer zweiten Flasche verbundene Metallplatte gebracht. Die zweite Flasche wird durch ein verschiebbares Funkenmikrometer entladen. Ist die Flasche positiv geladen, so ist der Funke kürzer, als wenn sie negativ ist, also soll das negative Niveau der Metallplatte grösser sein, als das positive.

Hier kann wegen des zur Entladung der negativen Elektricität erforderlichen geringen Potentials mehr negative Elektricität cet. par. von den Spitzen zur Metallplatte übergehen, als positive, wodurch abgesehen davon, dass der negative Funken im Mikrometer schon bei grösserem Abstande der Elektroden überspringen kann, seine Länge vergrössert wird.

Aus einem Versuche von Matteucci (§. 787), wonach ein mit einer abgeleiteten Hülle umgebenes, durch Verbindung mit einer geladenen Flasche elektrisirtes Elektroskop schneller seine Ladung verliert, wenn es negativ ist, lässt sich nichts folgern, da reine trockene Luft gar keine Elektricität fortführt, also die Verhältnisse durchaus unbestimmt sind.
